

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Ι.Α. Τσιρογιάννης

**Προσδιορισμός δεικτών θερμικής και
υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για
τη διαχείριση του μικροκλίματος και της
άρδευσης στο θερμοκήπιο**

Διδακτορική διατριβή

2011

Προσδιορισμός δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη
διαχείριση του μικροκλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:

1. Κίττας Κωνσταντίνος, Καθηγητής (γνωστ. αντικ.: Γεωργικές Κατασκευές), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων της Δ.Δ.
2. Παπαδάκης Γεώργιος, Αν. Καθηγητής (γνωστ. αντικ.: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Μηχανολογικός Εξοπλισμός και Γεωργικές Εφαρμογές), Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας
3. Σάββας Δημήτριος, Αν. Καθηγητής, (γνωστ. αντικ.: Λαχανοκομία), Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας

Επταμελής εξεταστικής επιτροπή:

1. Κίττας Κωνσταντίνος, Καθηγητής (γνωστ. αντικ.: Γεωργικές Κατασκευές), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Επιβλέπων της Δ.Δ.
2. Μαυρογιαννόπουλος Γεώργιος, Καθηγητής (γνωστ. αντικ.: Θερμοκήπια και Υδροπονικές Καλλιέργειες), Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας
3. Νικήτα-Μαρτζοπούλου Χρυσούλα, Καθηγήτρια (γνωστ. αντικ.: Αγροτικές Κατασκευές και Θερμοκήπια), Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
4. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη Μαρία, Καθηγήτρια (γνωστ. αντικ.: Αρδεύσεις - Στραγγίσεις, Υδραυλική), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
5. Παπαδάκης Γεώργιος, Αν. Καθηγητής (γνωστ. αντικ.: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Μηχανολογικός Εξοπλισμός και Γεωργικές Εφαρμογές), Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας
6. Σάββας Δημήτριος, Αν. Καθηγητής, (γνωστ. αντικ.: Λαχανοκομία), Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθήνας
7. Κατσούλας Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής (γνωστ. αντικ.: Γεωργ. Κατασκ. στο Περιβ. Θερμοκηπίου), Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Προσδιορισμός δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη
διαχείριση του μικροκλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο

ISBN

Περίληψη

Τσιρογιάννης Ιωάννης

2011

Προσδιορισμός δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο

Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ν. Ιωνία Μαγνησίας

Αριθμός προκαταρκτικών σελίδων: xxviii

Συνολικός αριθμός σελίδων της διατριβής: 243

Αριθμός πινάκων: 11

Αριθμός εικόνων: 104

Αριθμός βιβλιογραφικών παραπομπών: 281

Η αποτελεσματική άρδευση συντελεί στην ποσοτική και ποιοτική βελτιστοποίηση της παραγωγής ενώ ταυτόχρονα συμβάλει στην μείωση των εισροών στην καλλιέργεια και των ανεπιθύμητων εκροών από αυτή. Η διαχείριση της άρδευσης σχετίζεται με τον καθορισμό της συχνότητας και της δόσης που με τη σειρά τους βασίζονται στην εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και στη δυνατότητα συγκράτησης υγρασίας από το υπόστρωμα, μπορεί δε να υλοποιηθεί με μία σειρά από προσεγγίσεις (χειρονακτικά, με χρονικό προγραμματισμό, με χρήση αισθητήρων κ.ο.κ.). Στο πλαίσιο αυτό ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πρακτική άποψη έχουν οι εφαρμογές που βασίζονται σε μετρήσεις απλών αισθητήρων όπως αυτοί που μετρούν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και αυτοί που μετρούν την υγρασία στο υπόστρωμα. Όμως σε καμία από τις περιπτώσεις αυτές δεν λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση της καλλιέργειας και για το λόγο αυτό το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στη διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης της άρδευσης με χρήση άμεσων μετρήσεων φυτικών παραμέτρων.

Το πρώτο από τα κύρια μέρη της παρούσας διατριβής αφορά αξιολόγηση μίας σειράς υφιστάμενων και νέων δεικτών υδατικής κατάστασης του φυτού που βασίζονται σε δεδομένα που προέρχονται από ανάκλαση ακτινοβολίας από την καλλιέργεια, με σκοπό τον εντοπισμό αυτών που μπορούν να έχουν πρακτική εφαρμογή στην διαχείριση της άρδευσης σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Τα πειράματα αφορούσαν λαχανοκομικές και ανθοκομικές καλλιέργειες και συγκεκριμένα ζέρμπερα και ρόκα. Η μέτρηση της ανάκλασης από την φυλλική επιφάνεια έγινε με χρήση φορητού πολυφασματικού ραδιόμετρου που μετρούσε σε 8 στενές φασματικές

περιοχές γύρω από τα μήκη κύματος 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810nm ενώ για την μείωση των θορύβων (π.χ. σκιές περιβάλλοντος) χρησιμοποιήθηκε ειδική τεχνική (επιφάνεια αναφοράς). Παράλληλα καταγράφονταν μία σειρά από παραμέτρους του εναέριου περιβάλλοντος, του υποστρώματος και της καλλιέργειας. Στο πλαίσιο του πειράματος με ζέρμπερα αξιολογήθηκε αρχικά η συσχέτιση μίας σειράς από συνδυασμούς της ανάκλασης σε διάφορα μήκη κύματος με γενικά αποδεκτούς δείκτες υδατικής κατάστασης όπως η στοματική αγωγιμότητα (gs), ο δείκτης θερμικής καταπόνησης της καλλιέργειας (CWSI) κοκ αλλά και παραμέτρους του υδατικού ισοζυγίου όπως το κατ'όγκο περιεχόμενο του υποστρώματος σε υγρασία (θ) και η εξατμισοδιαπνοή (ET). Στην συνέχεια των μετρήσεων, δόθηκε έμφαση στην αξιολόγηση σύνθετων φασματικών δεικτών και βρέθηκε ότι ορισμένοι από αυτούς παρουσιάζουν ικανοποιητική απόκριση ως προς την υδατική καταπόνηση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι εντοπίστηκαν καλές συσχετίσεις μεταξύ του δείκτη $sPRI = (R560 - R510)/(R560 + R510)$ και της gs, του sPRI και του θ, καθώς και του δείκτη $NDRB1 = (R710 - R460)/(R710 + R460)$ και του CWSI σε διάφορα επίπεδα υδατικής μεταχείρισης της καλλιέργειας.

Στο πείραμα με ρόκα βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ $sNDVI2 = (R810 - R560)/(R810 + R560)$ και θ καθώς και μεταξύ sPRI και CWSI. Φαίνεται μάλιστα ότι γενικά όσο η υδατική καταπόνηση αυξάνεται, ο sPRI ελαττώνεται.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ διαθεσιμότητας νερού και υδατικής κατάστασης και φασματικών δεικτών ανάκλασης στην περιοχή του ορατού και για τις δύο καλλιέργειες που μελετήθηκαν. Η ύπαρξη σημαντικών διαφορών στα φάσματα ανάκλασης μόνο μεταξύ αρδευόμενων και ισχυρά καταπονούμενων φυτών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάκλαση στο ορατό πιθανότατα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης μόνο όταν αυτή καθίσταται έντονη. Παρόμοιες απόψεις έχουν εκφραστεί και από άλλους ερευνητές.

Σε κάθε περίπτωση η αξιοποίηση πολυφασματικών φυτικών δεικτών αποτελεί ένα υποσχόμενο πεδίο έρευνας καθώς θα μπορούσε να οδηγήσει σε άμεσες και αντιπροσωπευτικές μεθόδους για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Όταν ένα τυπικό σύστημα αυτόματου ελέγχου άρδευσης χρησιμοποιεί ως είσοδο το χρονικό ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μετρίεται με ένα πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου, δεν λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση της καλλιέργειας. Πιθανότατα, στο μέλλον να προκύψει ένα σύστημα που να μπορεί να βασιστεί σε μία παρόμοια αρχή λειτουργίας, αλλά να εκτιμά τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας ολοκληρώνοντας την ανακλώμενη ακτινοβολία αντί για την προσπίπτουσα.

Το δεύτερο κύριο μέρος της εργασίας σχετίζεται με την αξιολόγηση αισθητήρων υδατικής κατάστασης του υποστρώματος (μέτρησης διαθέσιμης υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας) όσο αφορά την αξιοποίησή τους για αυτόματο καθορισμό των παραμέτρων του προγράμματος άρδευσης σε υδροπονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες και συγκεκριμένα σε καλλιέργεια τομάτας. Ακόμη μελετήθηκε η δυνατότητα συνδυασμού τους με τους πιο κοινούς τρόπους διαχείρισης της άρδευσης σε αυτές: το χρονικό προγραμματισμό και τον έλεγχο μέσω ολοκλήρωσης προσπίπτουσας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας. Καταγράφονταν οι σχετικές παράμετροι στο υπόστρωμα με μία σειρά αισθητήρων (Delta T ThetaProbe, Decagon Devices EC5 και 10HS και Grodan WCM-Control) ενώ παράλληλα γινόταν μέτρηση και μίας σειράς από παραμέτρους του εναέριου περιβάλλοντος.

Το βασικό συμπέρασμα ήταν ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα όσο αφορά την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης υγρασίας στο υπόστρωμα είναι η μεταβλητότητα των μετρήσεων η οποία εξαρτάται από τη θέση μέτρησης εντός του θερμοκηπίου, από τη θέση μέτρησης στο υπόστρωμα (πάνω, πλάι κοκ) όσο και από τον όγκο δείγματος μέτρησης του κάθε αισθητήρα. Πιθανότατα δεν είναι οι αισθητήρες το μεγαλύτερο πρόβλημα (εάν και σίγουρα μπορούν να γίνουν βελτιώσεις όσο αφορά τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά), αλλά μια σειρά από άλλες αιτίες (αρδευτικό σύστημα, πρόγραμμα άρδευσης κοκ) που είναι υπεύθυνες για τις αποκλίσεις που παρατηρούνται.

Δοκιμές που αφορούσαν τον συνδυασμό συστήματος άρδευσης με χρήση ολοκλήρωσης εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας για τον καθορισμό της συχνότητας άρδευσης και αισθητήρα εδαφικής υγρασίας (τοποθετημένου σε προσεκτικά επιλεγμένο χαρακτηριστικό σημείο του υποστρώματος) για καθορισμό της δόσης άρδευσης και της πιθανής νυχτερινής άρδευσης ήταν επιτυχημένες. Ακόμη η χρήση αισθητήρων υγρασίας για παραγωγή σημάτων κινδύνου όταν η υγρασία πέφτει κάτω από κάποιο προκαθορισμένο επίπεδο θα έπρεπε ήδη να συστήνεται σε κάθε εφαρμογή αυτόματου ελέγχου. Ενδιαφέρον θα είχε να αξιολογηθούν σε επίπεδο παραγωγής και αποτελεσματικότητας χρήσης νερού (για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου) διάφορες εναλλακτικές σχετικά με την χρήση αισθητήρων παραμέτρων στο υπόστρωμα για διαχείριση της άρδευσης.

Τέλος μία σειρά από παράλληλα αποτελέσματα προέκυψαν στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, όπως αξιολογήσεις σχετικά με χρήση μεθόδων εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής στο θερμοκήπιο, αξιολόγηση προγραμμάτων άρδευσης, σχέσεις υπολογισμού δείκτη φυλλικής επιφάνειας και σχέσεις βαθμονόμησης αισθητήρων μέτρησης υγρασίας υποστρώματος.

Ευχαριστήρια

Ευχαριστώ όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν σε αυτό το δύσκολο έργο και πάνω από όλους την οικογένειά μου.

Την σύζυγο μου Βασιλική Φραγκάκη χωρίς την αγάπη και την αμέριστη υποστήριξη της οποίας τίποτε δεν θα ήταν δυνατό και τα παιδιά μας Σοφία και Άρη για την ευτυχία με την οποία γεμίζουν την ζωή μου, δίνοντάς της νόημα. Τους γονείς μου Λάμπρο και Πότα, και την αδελφή μου Μαριώ για όσα έχουν κάνει και συνεχίζουν να κάνουν για μένα.

Τους καθηγητές μου, και πάνω από όλους τους κ.κ. Κίττα Κωνσταντίνο, Σάββα Δημήτριο και Παπαδάκη Γεώργιο για όσα μου δίδαξαν. Τον Επίκουρο Καθηγητή του Π.Θ. κ. Κατσούλα Νικόλαο για την συνεχή και σοβαρή υποστήριξη που μου προσέφερε.

Τους συναδέλφους μου στο ΤΕΙ Ηπείρου και κυρίως τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γκίζα Γεώργιο για την έμπρακτη συμπαράστασή στην προσπάθειά μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Ευχαριστήρια	viii
Κατάλογος συμβόλων και όρων	xxiv
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	1
Θερμοκηπιακές καλλιέργειες.....	1
Ανάγκες θερμοκηπιακών καλλιεργειών σε νερό	1
Συστήματα ελέγχου άρδευσης	2
Αντικείμενο και δομή της εργασίας	3
Κεφάλαιο 2 - Θεωρητική ανάλυση	6
Υδατικές σχέσεις.....	6
Εκτίμηση αναγκών των φυτών σε νερό – υδατική καταπόνηση.....	9
Μέθοδοι ελέγχου της υδατικής κατάστασης των φυτών	13
Μετρήσεις παραμέτρων υδατικών δεικτών από απόσταση και ανάπτυξη νέων δεικτών που βασίζονται στην δυνατότητα αυτή	30
Εκπομπή ακτινοβολίας από τα φυτά στην περιοχή του ορατού	32
Εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τα φυτά.....	32
Ανάκλαση ακτινοβολίας από τα φυτά	34
Ανάκλαση από μεμονωμένα φύλλα	36
Ανάκλαση από φυλλικές επιφάνειες	39
Ανακλαστικότητα και υδατική κατάσταση φύλλου και φυλλικής επιφάνειας.....	42
Χρήση δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο.....	52
Δυνατότητες εφαρμογής δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών	56
Μετρήσεις παραμέτρων υποστρώματος (θ, EC)	58
Η υγρασία στα υποστρώματα υδροπονίας	58
Χρήση αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος στο πλαίσιο της διαχείρισης άρδευσης σε υδροπονικές καλλιέργειες	67
Συμπεράσματα	76
Στόχος της εργασίας	77
Κεφάλαιο 3 - Υλικά, μέθοδοι και τεχνικές	79
Διατάξεις και εξοπλισμός μετρήσεων	81
Γυάλινο θερμοκήπιο AAT του ΤΕΙ Ηπείρου	81
Πλαστικό θερμοκήπιο Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος ΠΘ	84

Φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο και τεχνική χρήσης του εντός του θερμοκηπίου.....	86
Χρήση CropScan, MSR μέσα στο θερμοκήπιο	87
Γενική μεθοδολογία υπολογισμού προγράμματος άρδευσης στο θερμοκήπιο	88
Κεφάλαιο 4 - Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού υδατικών αναγκών θερμοκηπιακής καλλιέργειας πιπεριάς	91
Εισαγωγή.....	91
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος.....	92
Θερμοκήπιο και φυτικό υλικό.....	92
Μετρήσεις και υπολογισμοί	93
Αποτελέσματα	96
Κεφάλαιο 5 - Επίδραση του προγράμματος άρδευσης στην ποιότητα και ποσότητα παραγωγής υδροπονικής καλλιέργειας ζέρμπερας – Αρχικές μετρήσεις με σκοπό την αξιολόγηση σχέσης υδατικής κατάστασης και ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια	99
Εισαγωγή.....	99
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος.....	100
Θερμοκήπιο και φυτικό υλικό.....	100
Άρδευση: σύστημα, μεταχειρίσεις, κατάρτιση προγραμμάτων	101
Μετρήσεις.....	103
Αποτελέσματα και συζήτηση.....	106
Μικροκλίμα θερμοκηπίου	106
Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	106
Παραγωγή δρεπτών ανθέων (ποσότητα και ποιότητα)	107
Διαπνοή καλλιέργειας και κατανάλωση νερού	111
Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού.....	112
Υδατική κατάσταση φυτών και σχετικοί φασματικοί δείκτες.....	113
Συμπεράσματα	116
Κεφάλαιο 6 - Μελέτη της σχέσης θ , CWSI, r_c , και ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια σε ανθοκομική καλλιέργεια υπό διάφορα επίπεδα υδατικής κατάστασης.....	117
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος.....	118
Αποτελέσματα	123
Σύνοψη προβλημάτων μέτρησης ανάκλασης εντός του θερμοκηπίου και λύσεων που προτάθηκαν και εφαρμόστηκαν	128

Κεφάλαιο 7 – Μελέτη της σχέσης θ , CWSI και ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια σε καλλιέργεια ρόκας υπό διάφορα επίπεδα υδατικής κατάστασης	129
Εισαγωγή.....	129
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος.....	131
Θέση εγκατάστασης, υπόστρωμα και φυτικό υλικό.....	131
Άρδευση.....	133
Συστήματα μέτρησης.....	133
Αποτελέσματα και συζήτηση.....	137
Μικροκλίμα θερμοκηπίου	137
Παραγωγή φύλλων δείκτης φυλλικής επιφάνειας, albedo και στοματική αγωγιμότητα.....	137
Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και φυτικός συντελεστής	138
Διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος, υδατική κατάσταση των φυτών και δείκτες ανάκλασης	140
Συμπεράσματα	145
Κεφάλαιο 8 – Χρήση αισθητήρων μέτρησης υδατικών επιπέδων υποστρώματος για προγραμματισμό αρδεύσεων στο πλαίσιο υδροπονικών θερμοκηπιακών καλλιεργειών	147
Αξιολόγηση εφαρμογής αισθητήρων μέτρησης υγρασίας σε υποστρώματα υδροπονίας.....	147
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος	148
Αξιολόγηση επιλογών (ως προς θέση στο υπόστρωμα και χρόνο μέτρησης) σχετικά με την τοποθέτηση αισθητήρων	158
Αξιολόγηση δυνατότητας χρήσης αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος στο πλαίσιο της διαχείρισης άρδευσης	166
Συζήτηση και συμπεράσματα	186
Χρήση και διαδικασίες βαθμονόμησης αισθητήρων	190
ΔT-Theta probe	190
Decagon 10HS.....	193
Decagon EC5.....	196
Grodan WCM-Control.....	200
Κεφάλαιο 9 – Αυτόματος έλεγχος της άρδευσης μέσω μέτρησης παραμέτρων του εναέριου περιβάλλοντος και του ριζοστρώματος σε θερμοκήπια που εντάσσονται σε έργα πράσινου	204
Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή	204
Η άρδευση στα θερμοκήπια βοτανικών κήπων	206

Ερωτηματολόγιο.....	207
Αποτελέσματα – Συζήτηση - Συμπεράσματα.....	209
Κεφάλαιο 10 – Συμπεράσματα	212
Δείκτες υδατικής κατάστασης που βασίζονται σε δεδομένα ανάκλασης ακτινοβολίας από την καλλιέργεια.....	212
Δυνατότητα χρήσης δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο.....	217
Αξιολόγηση αισθητήρων υδατικής κατάστασης του υποστρώματος σε υδροπονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες.....	218
Παράλληλα αποτελέσματα	219
Βιβλιογραφία	221
Summary - Water management of greenhouse cultivations using plant water condition indices.....	243

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Οι διάφορες προσεγγίσεις μέτρησης της υδατικής κατάστασης των φυτών και οι αντίστοιχοι δείκτες.....	21
Πίνακας 2 Σύνοψη των βασικότερων πιθανών χρήσεων πολύ-φασματικής καταγραφής για εκτίμηση υδατικής καταπόνησης (Jones και Schofield, 2008). 57	
Πίνακας 3 Μέσες τιμές (για την περίοδο της ημέρας 10:00-18:00) ενδεικτικών παραμέτρων του κλίματος στο θερμοκήπιο κατά την περίοδο των μετρήσεων. 96	
Πίνακας 4 Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό και το εξωτερικό του θερμοκηπίου κατά την περίοδο μετρήσεων. Η τυπική απόκλιση των τιμών δίνεται στις παρενθέσεις.	106
Πίνακας 5 Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (I_{LA}) της καλλιέργειας για τις μεταχειρίσεις HIF και LIF. Η τυπική απόκλιση των τιμών δίνεται στις παρενθέσεις.	107
Πίνακας 6 Βελτιώσεις για μετρήσεις ανάκλασης από φυλλική επιφάνεια	128
Πίνακας 7 Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων εντός και εκτός του θερμοκηπίου για την περίοδο των μετρήσεων (στις παρενθέσεις δίνεται το τυπικό σφάλμα).	137
Πίνακας 8 Μέσες τιμές και αποκλείσεις για μετρήσεις υγρασίας με Decagon 10HS	163
Πίνακας 9 Μέσες τιμές και αποκλείσεις για μετρήσεις υγρασίας με Decagon EC5. 164	
Πίνακας 10 Πιθανές τιμές ορίων προγραμματισμού με αισθητήρες υγρασίας υποστρώματος, (10:00-19:00 / αρχικός προγραμματισμός με ηλ. ακτινοβολία)	187
Πίνακας 11 Πιθανές τιμές ορίων προγραμματισμού με αισθητήρες υγρασίας υποστρώματος, (10:00-19:00 / εναλλακτικός προγραμματισμός με ηλ. ακτινοβολία)	188

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Σχηματική απεικόνιση της κίνησης του νερού στα φυτά (Darling, 2008).....	6
Εικόνα 2 Ημερήσια διακύμανση υδατικού δυναμικού φύλλου για δύο διαφορετικά είδη φυτών κατά τη διάρκεια μίας τυπικής καλοκαιρινής ημέρας στην περιοχή της Μεσογείου (Salleo και Nardini, 2003)	8
Εικόνα 3 CROPWAT, πρόγραμμα για τον υπολογισμό εξατμισοδιαπνοής (FAO, 2008).....	12
Εικόνα 4 Χρήση τενσιόμετρων συνδεδεμένων σε αυτοματοποιημένο σύστημα για τη διαχείριση υποάρδευσης χρησιμοποιούν σε γλαστρικές καλλιέργειες με υπόστρωμα ελαφρόπετρα και υποάρδευση (POPRURA, 2008).....	14
Εικόνα 5 Οι ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών προκάλεσε κάψιμο στο φύλλο ζέρμπερας το οποίο έχει καλυφθεί από βαζελίνη ώστε να ανασταλεί η εξάτμιση	16
Εικόνα 6 Εμπειρική μέθοδος υπολογισμού του CWSI (Kacira et al. 2005) [Τc: θερμοκρασία φύλλου και Ta: θερμοκρασία αέρα]	16
Εικόνα 7 Διάγραμμα εντοπισμού ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας φυτοκάλυψης (Widmoser, 2010).....	18
Εικόνα 8 Καταπονήσεις, αντιδράσεις των φυτών και αισθητήρες τηλεπισκόπησης που μπορούν να καταγράψουν τα σχετικά σήματα (Jones και Schofield, 2008).	31
Εικόνα 9 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.....	34
Εικόνα 10 Φασματικές υπογραφές ανάκλασης από στεγνό γυμνό έδαφος, πράσινη βλάστηση και καθαρό νερό (Smith, 2000β)	35
Εικόνα 11 Ανάκλαση, απορρόφηση και διέλευση ηλιακής ακτινοβολίας από φύλλο καπνού (400-2700nm – 0,4-2,7μ) (Knipling, 1970).....	36
Εικόνα 12 Τομή τυπικού φύλλου που δείχνει τους δρόμους που ακολουθούν τα μόρια του νερού κατά τη στοματική διαπνοή (Καράταγλης, 1992)	37
Εικόνα 13 Ανάκλαση από λευκό και πράσινο τμήμα φύλλου γερανιού (400-1200nm – 0,4-1,2 μ) (Knipling, 1970).....	37
Εικόνα 14 Η επίδραση του κορεσμού των μεσοκυττάρων χώρων με νερό στην φασματική ανάκλαση φύλλων φασολιού (Knipling, 1970).....	39
Εικόνα 15 Εικόνες από αισθητήρα RGB-ορατό (αριστερά) και στο κοντινό υπέρυθρο-800nm (δεξιά) για ένα φύλλο πλάτανου (<i>Platanus acerifolia</i>) το οποίο έχει τοποθετηθεί πάνω από ένα μικρότερο φύλλο (πάνω σειρά) και για δίχρωμο φύλλο κισσού (<i>Hedera helix L.</i>) (κάτω σειρά) (Lenk κ.α. 2007).....	41
Εικόνα 16 Φάσμα ανάκλασης από φυτικές επιφάνειες διαφορετικού τύπου καθώς και από φύλλα υπό μάρανση (Smith, 2001α).....	42

Εικόνα 17 Η επίδραση της αφυδάτωσης του φύλλου στην ανάκλαση από φύλλα φασολιού (100% - πλήρως ενυδατωμένο φύλλο) (Knipling, 1970).....	44
Εικόνα 18 Σχέση μεταξύ φωτοσύνθεσης και αντίστασης στη διαπνοή για καλλιέργεια αραβόσιπου (Sellers, 1985)	45
Εικόνα 19 Εντοπισμός υδατικής καταπόνησης με χρήση του PRI (-0.09 επαρκώς αρδευόμενα φυτά, 0.09 φυτά υπό υδατική καταπόνηση). Το sPRI: είναι ο εκτιμώμενος PRI για μη-καταπονημένα φυτά όπως υπολογίζεται μέσω μαθηματικών προσομοιωμάτων (Zarco-Tejada et al., 2008)	48
Εικόνα 20 Το σύστημα SmartCrop (Smartfield, 2011)	55
Εικόνα 21 Το σύστημα CropView (Hortimax, 2011).....	55
Εικόνα 22 Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας (έως το όριο της ρυθμιστικής ικανότητας νερού) ορισμένων τυπικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε καλλιέργειες εκτός εδάφους - με λογαριθμική κλίμακα στη μύζηση (Milks κ.α. (1989α, β και γ) από Savvas, 2009)	60
Εικόνα 23 Αριστερά, Χ.Κ.Υ. (μετρήσεις και μαθηματικό μοντέλο) τεσσάρων τύπων ελαφρόπετρας που διαφέρουν στο μέγεθος των κόκκων (Gizas και Savvas, 2007). Δεξιά, Η περιεκτικότητα ενός υποστρώματος σε υγρασία μεταβάλλεται (ελαττώνεται) καθώς αυξάνει το ύψος του (Savvas, 2009). Οι τιμές που παρουσιάζονται υπολογίζονται με εφαρμογή του μοντέλου της Χ.Κ.Υ με h ίσο με το ύψος από τη βάση του υποστρώματος	62
Εικόνα 24 Μεταβολές στην υδατοχωρητικότητα της ελαφρόπετρας σε συνάρτηση με το ύψος της στο φυτοδοχείο (ολοκλήρωση για φυτοδοχεία με ίδιο εμβαδόν εγκάρσιας τομής σε όλο το ύψος τους) (Savvas, 2009)	63
Εικόνα 25 Υγρασία σε υποστρώματα πετροβάμβακα (www.grodan.com)	64
Εικόνα 26 Χ.Κ.Υ. και καμπύλες υδραυλικής αγωγιμότητας για δύο υποστρώματα υδροπονίας (Raviv κ.α., 2002)	66
Εικόνα 27 Γυάλινο θερμοκήπιο Τμ. ΑΑΤ ΤΕΙ Ηπείρου	82
Εικόνα 28 Σύστημα ελέγχου κλίματος και θρέψης Autonet	83
Εικόνα 29 Εσωτερική άποψη του θερμοκηπίου την περίοδο του πειράματος σχετικά με τη συχνότητα άρδευσης σε καλλιέργεια ζέρμπερας (2008-2009)	84
Εικόνα 30 Πλαστικό θερμοκήπιο Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του ΠΘ.....	85
Εικόνα 31 Φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο CropScan	86
Εικόνα 32 Τυπικό διάγραμμα ανάκλασης από φυτική επιφάνεια (CropScan, σημειώνονται οι περιοχές μέτρησης του MultiSpectral Radiometer 87)	87
Εικόνα 33 Μετρήσεις ανακλαστικότητας με πολυφασματικό ραδιόμετρο πάνω φυτική επιφάνεια και επιφάνεια αναφοράς (λευκή)	88

Εικόνα 34 Τομή του θερμοκηπίου με την πειραματική εγκατάσταση και τα όργανα μέτρησης των κλιματικών παραμέτρων: 1-πυρανόμετρο, 2-αισθητήρας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασία αέρα, 3-θερμοζεύγη για μέτρηση θερμοκρασίας φύλλου, 4-λυσιμετρικοί ζυγοί και 5-παροχόμετρο.	93
Εικόνα 35 Τιμές ETc που μετρήθηκαν με τους λυσιμετρικούς ζυγούς (□) στα δύο τμήματα σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο FAO PM (ο) και το μοντέλο Stanghellini (x).	97
Εικόνα 36 Μετρημένη ETc (ημερήσια) σε σχέση με τα δύο μοντέλα υπολογισμού για τα δύο τμήματα	98
Εικόνα 37 Τομή του θερμοκηπίου με σημειωμένα τα όργανα μέτρησης: T, RH = αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα (δείκτες: ο= εξωτερική, ι= εσωτερική), R _G = πυρανόμετρα (δείκτες: ο= εξωτερικό, ι= εσωτερικό), RV = συγκέντρωση απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος και IV = μέτρηση όγκου θρεπτικού διαλύματος που παρέχεται σε κάθε πάγκο	101
Εικόνα 38 Καμπύλες συγκράτησης υγρασίας (σχέση μεταξύ περιεχόμενης υγρασίας και μύζησης που ασκείται από το πορώδες μέσο) για τέσσερις τύπους ελαφρόπετρας (όσο αφορά το μέγεθος κόκκων). Τα σύμβολα αναφέρονται σε μετρημένες τιμές ενώ οι καμπύλες στα σχετικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν μέσω μη-γραμμικής ανάλυσης συσχέτισης (Gizas και Savvas, 2007).	102
Εικόνα 39 Εξέλιξη του αριθμού ανθέων που συγκομίστηκαν ανά m ² θερμοκηπίου; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν ± τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)	108
Εικόνα 40 Εξέλιξη του αθροιστικού νωπού βάρους των ανθέων που συγκομίστηκαν ανά m ² θερμοκηπίου; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν ± τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)	109
Εικόνα 41 Εξέλιξη του μέσου μήκους μίσχου των ανθέων που συγκομίστηκαν; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν ± τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)	110
Εικόνα 42 Εξέλιξη της μέσης διαμέτρου άνθους κατά την περίοδο μετρήσεων; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν ± τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)	111
Εικόνα 43 Εξέλιξη της διαπνοής της καλλιέργειας κατά την περίοδο μετρήσεων; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν ± τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)	112
Εικόνα 44 Διακύμανση της διαφοράς θερμοκρασίας φυλλικής επιφάνειας – αέρα κατά τη διάρκεια μίας ημέρας (16/6) για τις δύο μεταχειρίσεις (LIF: συνεχής γραμμή, HIF: διακεκομμένη γραμμή). Με τελείες σημειώνονται τα αρδευτικά γεγονότα.	114

Εικόνα 45 Μεταβολή του sPRI (συνεχής γραμμή) και της στοματικής αντίστασης φύλλων (διακεκομμένη γραμμή) για τη μεταχείριση LIF στις 16 Ιουλίου. Τα τρίγωνα αντιστοιχούν στα αρδευτικά γεγονότα.	115
Εικόνα 46 Μεταβολή του sPRI (συνεχής γραμμή) και της στοματικής αντίστασης φύλλων (διακεκομμένη γραμμή) για τη μεταχείριση HIF στις 16 Ιουλίου. Τα τρίγωνα αντιστοιχούν στα αρδευτικά γεγονότα.	115
Εικόνα 47 Συνεχής διαβροχή για τη μέτρηση της T_{min} (αριστερά) και κάλυψη με βαζελίνη – εμπόδιση διαπνοής για τη μέτρηση της T_{max} (δεξιά).....	119
Εικόνα 48 Μετρήσεις ανάκλασης πάνω από λευκή επιφάνεια αναφοράς	121
Εικόνα 49 Χαρακτηριστικά φάσματα ανάκλασης φυλλικής επιφάνειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ETc, 50%ETc και 0%ETc-Υδατικό στρες) το μεσημέρι (14:00) μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (οι καμπύλες για τα 760 και τα 810nm αναφέρονται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα)	124
Εικόνα 50 Ημερήσια πορεία της ανάκλασης στα 760nm από φυλλική επιφάνειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ETc, 50%ETc και 0%ETc-Υδατικό στρες) κατά τη διάρκεια μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (14/7/2009).....	124
Εικόνα 51 Διαφορά στην ανακλαστικότητα μεταξύ μεταχείρισης υπό υδατική καταπόνηση (0%ETc) και επαρκώς αρδευόμενης μεταχείρισης (100%ETc) κατά τη διάρκεια μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας για επιλεγμένα μήκη κύματος και φασματικούς φυτικούς δείκτες.....	125
Εικόνα 52 Σχηματική παράσταση μηχανισμών ολοκλήρωσης προσπίπτουσας εξωτερικής ακτινοβολίας (δεξιά) και ανακλώμενης ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια (αριστερά).....	126
Εικόνα 53 Εξέλιξη του ολοκληρώματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας (ο υπολογισμός ξεκινά από το 0 μετά από κάθε αρδευτικό γεγονός) για μερικώς (33%ETc) και επαρκώς αρδευόμενες (100%ETc) μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια μίας τυπικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας. Οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στο χρόνο των αρδευτικών γεγονότων (συνεχής για την 33%ETc, συνεχείς και διακεκομμένες για την 100%ETc).....	127
Εικόνα 54 Πειραματική διάταξη στο θερμοκήπιο και όργανα μέτρησης παραμέτρων εναέριου περιβάλλοντος και καλλιέργειας: T, RH = αισθητήρες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα (δείκτες: o= εξωτερικό, i= εσωτερικό), RG = πυρανόμετρο (δείκτες: o= εξωτερικό, i= εσωτερικό)	132
Εικόνα 55 Σαρωμένη εικόνα φύλλων για υπολογισμό δείκτη φυλλικής επιφάνειας	135

Εικόνα 56 Άποψη της καλλιέργειας με τη λευκή επιφάνεια αναφοράς για την ανάκλαση	136
Εικόνα 57 Υγρασία εδάφους (VWC σε m^3m^{-3}) και μετρημένη εξατμισοδιαπνοή, ET_{lys} (ml min^{-1}) για τη μεταχείριση 100% ET_c . Η γραμμή με κουκκίδες αντιστοιχεί στην υδατοικανότητα.	139
Εικόνα 58 Γραμμική σχέση μεταξύ μετρημένης (μέσω του λυσίμετρου) εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (Penman – Monteith).....	140
Εικόνα 59 Χαρακτηριστικά φάσματα ανάκλασης από κόμη καλλιέργειας ρόκας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100% ET_c , 66% ET_c και 33% ET_c) κατά τη διάρκεια μίας καλοκαιρινής ημέρας στο μέσο του καλοκαιριού (30/7). Οι καμπύλες για τα 760 και τα 810nm αναφέρονται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα.	141
Εικόνα 60 Υγρασία εδάφους (VWC σε m^3m^{-3}) και δείκτες ανάκλασης πάνω από καλλιέργεια ρόκας ως προς το χρόνο (για τρεις συνεχόμενες ηλιόλουστες ημέρες στο μέσο του καλοκαιριού, 28-30/7) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100% ET_c , 66% ET_c και 33% ET_c).....	142
Εικόνα 61 Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ κόμης και αέρα (T_c-T_i) και δείκτες ανάκλασης πάνω από καλλιέργεια ρόκας ως προς το χρόνο (για μία ηλιόλουστη ημέρα στο μέσο του καλοκαιριού, 30/7) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100% ET_c , 66% ET_c και 33% ET_c).....	143
Εικόνα 62 Σχέση μεταξύ sPRI και CWSI για τη μεταχείριση 100% ET_c	144
Εικόνα 63 Φωτογραφία κόμης ρόκας (στη θέση του πολυφασματικού ραδιόμετρου) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100% ET_c , 66% ET_c και 33% ET_c) στις 13:00 (τοπική ώρα) μίας ηλιόλουστης ημέρας στη μέση του καλοκαιριού (30/7)	145
Εικόνα 64 Σκαρίφημα της κάτοψης του θερμοκηπίου και εικόνα κατά την περίοδο της καλλιέργειας (3/2011, κόκκινο βέλος γωνία λήψης φωτογραφίας).	149
Εικόνα 65 Χ.Κ.Υ. για περλίτη και πετροβάμβακα (σύνθεση από Milks κ.α., 1989, Bougoul κ.α., 2005, Al Naddaaf κ.α., 2011). Η γαλάζια περιοχή αντιπροσωπεύει το εύρος του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού (ΕΔΝ – EAW).	151
Εικόνα 66 Δεδομένα από νυχτερινή άρδευση σε καλλιέργεια τομάτας σε Grodan (4/2003). Νωρίς το απόγευμα υπάρχει ανεπιθύμητη μείωση των επιπέδων WC και παράλληλη αύξηση της EC (πιθανότατα λόγω μεγάλου ποσοστού απορροής ανά κύκλο). Εάν δεν λυθεί το πρόβλημα πιθανότατα θα προκύψουν ποιοτικά προβλήματα στην παραγωγή λόγω υψηλής EC. Η προσπάθεια επίλυσης μέσω	

νυχτερινής άρδευσης αποτυγχάνει καθώς η EC συνεχίζει να αυξάνει (Lee, 2010)	153
Εικόνα 67 ML2 ThetaProbe (ΔΤ, 2010)	157
Εικόνα 68 Ο Em50 Data Logger και οι αισθητήρες EC5 και 10HS (Decagon, 2010)	157
Εικόνα 69 Το Water Content Meter (WCM-Control) της Grodan	158
Εικόνα 70 Μεταβολές υγρασίας σε υπόστρωμα Grodan Expert μετά από άρδευση (Bougoul και Boulard, 2006)	158
Εικόνα 71 Μεταβλητότητα μετρήσεων υγρασίας με ML2 ThetaProbe σε πετροβάμβακα και περλίτη (17/2/2011)	161
Εικόνα 72 Διαφοροποίηση τιμών μετρήσεων υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος (μέτρηση με Grodan WCM)	163
Εικόνα 73 Ημερήσια διακύμανση περιεχομένου σε υγρασία (WC) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) σε υπόστρωμα υδροπονικής καλλιέργειας (Lee, 2010)	168
Εικόνα 74 Εφαρμογή στρατηγικής διαχείρισης άρδευσης (Lee, 2010)	170
Εικόνα 75 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ημέρας καθώς και μέση μεταβολή νύχτας της θ (%v/v) και της EC (dS/m) για τα δύο υποστρώματα (μετρήσεις με Grodan VCM-Control), για ηλιόλουστες (H) και νεφосκεπείς (N) ημέρες για τις τρεις περιόδους άρδευσης	171
Εικόνα 76 Ημερήσια πορεία της εξατμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξατμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού και της υγρασίας υποστρώματος για δύο χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη (26/2) και μία νεφосκεπή (28/2)) κατά την πρώτη περίοδο άρδευσης (εμπειρικός χρονικός υπολογισμός)	173
Εικόνα 77 Ημερήσια πορεία της εξατμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξατμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού, της υγρασίας υποστρώματος και της EC για δύο χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη (7/4) και μία νεφосκεπή (1/4)) κατά την δεύτερη περίοδο άρδευσης (θεωρητικά υπολογισμένος χρονικός προγραμματισμός)	174
Εικόνα 78 Ημερήσια πορεία της εξατμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξατμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού, της υγρασίας υποστρώματος και της EC για δύο χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη (15/4) και μία νεφосκεπή (17/4)) κατά την δεύτερη περίοδο άρδευσης (αυτόματος προγραμματισμός με βάση την ηλιακή ακτινοβολία)	175
Εικόνα 79 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένοι από επάνω) κατά τη διάρκεια	

ηλιόλουστων και νεφосκεπών ημερών στο τέλος του χειμώνα (25/2/2011 έως 1/3/2011). Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός.	177
Εικόνα 80 Επίπεδα υγρασίας υποστρώματος σε πετροβάμβακα και περλίτη σε διάφορα ύψη από τη βάση του υποστρώματος. Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός	178
Εικόνα 81 Τοποθέτηση αισθητήρα 10HS κάθετα προς τις οριζόντιες επιφάνειες του υποστρώματος.....	178
Εικόνα 82 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένους από το πλάι σύμφωνα με οδηγίες κατασκευαστή) στις αρχές της άνοιξης (24-25/3/2011). Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός.	179
Εικόνα 83 Επίδραση διακοπής άρδευσης σε υγρασία υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένους από το πλάι σύμφωνα με οδηγίες κατασκευαστή) στις αρχές της άνοιξης (26-29/3/2011). Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός.....	180
Εικόνα 84 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Grodan WCM και Decagon 10HS) στα μέσα της άνοιξης (7/4/2011). Θεωρητικά υπολογισμένος χρονικός προγραμματισμός.....	181
Εικόνα 85 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα (μέτρηση με διάφορους τύπου αισθητήρων, σε διάφορες θέσεις) κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων και νεφосκεπών ημερών στα μέσα της άνοιξης (15/4/2011 έως 18/4/2011). Προγραμματισμός με ολοκλήρωση ηλιακής ακτινοβολίας.	183
Εικόνα 86 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος περλίτη (μέτρηση με διάφορους τύπου αισθητήρων, σε διάφορες θέσεις) κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων και νεφосκεπών ημερών στα μέσα της άνοιξης (15/4/2011 έως 18/4/2011). Προγραμματισμός με ολοκλήρωση ηλιακής ακτινοβολίας.....	184
Εικόνα 87 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος κατά τη διάρκεια δύο ημερών (σύγκριση ελέγχου με μόνο ηλιακή ακτινοβολία (L1) σε σχέση με έλεγχο με συνδυασμό ηλιακής ακτινοβολίας και αισθητήρα υγρασίας υποστρώματος (L2)).	186
Εικόνα 88 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ThetaProbe.....	190
Εικόνα 89 Πειραματικά ζεύγη τιμών και παρεμβολές (γραμμική, πολυωνυμική 3 ^{ου} και πολυωνυμική 5 ^{ου} βαθμού για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με ML2 ThetaProbe σε Grodan Expert.....	192
Εικόνα 90 Πειραματικά ζεύγη τιμών και παρεμβολές (γραμμική και πολυωνυμική 3 ^{ου} βαθμού για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με ML2 ThetaProbe σε Isocon Perloflor Hydro 1	193

Εικόνα 91 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και περιοχή δείγματος του 10HS (Cobos, 2008α).....	194
Εικόνα 92 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με 10HS σε Grodan Expert.....	195
Εικόνα 93 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με 10HS σε Isocon Perloflor Hydro 1.....	196
Εικόνα 94 Ο αισθητήρας EC5 και η σχετική περιοχή δείγματος (Cobos, 2008β)....	197
Εικόνα 95 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με EC5 σε Grodan Expert.....	199
Εικόνα 96 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με 10HS σε Isocon Perloflor Hydro 1.....	199
Εικόνα 97 Βαθμονόμηση WCM-Control Grodan για μέτρηση υγρασίας σε Isocon Perloflor Hydro 1	202
Εικόνα 98 Καμπύλες βαθμονόμησης για μέτρηση EC με Grodan WCM σε περλίτη	203
Εικόνα 99 Το συγκρότημα θερμοκηπίων στο βοτανικό κήπο Cluz Napoca στη Ρουμανία.....	206
Εικόνα 100 Εσωτερικό θερμοκηπίου βοτανικού κήπου (Tallinn Botanic Garden) ..	207
Εικόνα 101 Άρδευση θερμοκηπίων σε βοτανικούς κήπους.....	210
Εικόνα 102 Χρήση αισθητήρων για διαχείριση της άρδευσης σε θερμοκήπια βοτανικών κήπων.....	211

Κατάλογος εξισώσεων

Εξίσωση 1 Υπολογισμός ροής νερού στο υπόστρωμα	7
Εξίσωση 2 Υδατικό δυναμικό.....	8
Εξίσωση 3 Υδατικό δυναμικό φύλλου	9
Εξίσωση 4 Ενεργειακό ισοζύγιο εξατμισοδιαπνοής	10
Εξίσωση 5 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής (Penman-Monteith).....	10
Εξίσωση 6 Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού	13
Εξίσωση 7 Δείκτης υδατικής καταπόνησης καλλιέργειας	15
Εξίσωση 8 Θερμοκρασιακά όρια φυλλικής επιφάνειας	17
Εξίσωση 9 Θερμοδυναμική σχέση υπολογισμού υδατικού δυναμικού φύλλων	19
Εξίσωση 10 Διαφορά θερμοκρασίας φύλλου - αέρα	33
Εξίσωση 11 Βασικές μορφές φασματικών φυτικών δεικτών	46
Εξίσωση 12 Περιεκτικότητα κατ' όγκο σε υγρασία	58
Εξίσωση 13 Μοντέλο Van Genuchten	59
Εξίσωση 14 Ροή νερού σε πορώδες μέσο.....	65
Εξίσωση 15 Δόση άρδευσης	89
Εξίσωση 16 Ανάγκες καλλιέργειας σε νερό.....	89
Εξίσωση 17 Συντελεστής αναγκών ζ.....	89
Εξίσωση 18 Σχέση υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής κατά Penman-Monteith.....	93
Εξίσωση 19 Τροποποιημένες σχέσεις Penman-Monteith για εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής εντός θερμοκηπίου.....	93
Εξίσωση 20 Εκτίμηση επιφάνειας φύλλου ζέρμπερας	107
Εξίσωση 21 Εκτίμηση δείκτη φυλλικής επιφάνειας ζέρμπερας	107
Εξίσωση 22 Υδατικό ισοζύγιο μάζας.....	111
Εξίσωση 23 Φασματικός δείκτης sPRI.....	113
Εξίσωση 24 Χ.Κ.Υ. για Ελληνικό περλίτη υδροπονίας	150
Εξίσωση 25 Χ.Κ.Υ. για πετροβάμβακα	151
Εξίσωση 26 Σχέση διηλεκτρικής αγωγιμότητας και σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe	191
Εξίσωση 27 Απλή σχέση διηλεκτρικής αγωγιμότητας και υγρασίας υποστρώματος σε αισθητήρα ThetaProbe.....	191
Εξίσωση 28 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe για Grodan Expert	192
Εξίσωση 29 Σχέση 5 ^{ου} βαθμού υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe για Grodan Expert.....	192

Εξίσωση 30 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe για Isocon Perloflor	193
Εξίσωση 31 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα 10HS για Grodan Expert	195
Εξίσωση 32 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα 10HS για Isocon Perloflor	196
Εξίσωση 33 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα EC5 για πετροβάμβακα	197
Εξίσωση 34 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα EC5 για περλίτη.....	198
Εξίσωση 35 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα EC5 για Grodan Expert	198
Εξίσωση 36 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα EC5 για Isocon Perloflor	199
Εξίσωση 37 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα WCM για Isocon Perloflor	201
Εξίσωση 38 Σχέσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας και σήματος σε αισθητήρα WCM για Isocon Perloflor	202

Κατάλογος συμβόλων και όρων

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Μονάδα μέτρησης
c_p	Ειδική θερμότητα αέρα υπό σταθερή πίεση	Air specific heat	$\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
CWSI	Δείκτης θερμικής καταπόνησης	Crop Water Stress Index	-
d_r	Ποσοστό απορροής	Drainage fraction	%
e_a	Πίεση υδρατμών για θερμοκρασία αέρα	Actual vapour pressure	kPa
EAW	Εύκολα διαθέσιμο νερό	Easily Available Water	%
EC	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Electric conductivity	dS m^{-1}
E_i	Αποτελεσματικότητα του συστήματος άρδευσης	Irrigation system efficiency	%
e_s	Πίεση υδρατμών στο κορεσμό	Saturation vapour pressure	kPa
ET_c	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας	Potential cultivation evapotranspiration	mm t^{-1}
ET_{ly}	Ρυθμός διαπνοής των φυτών, μετρημένος με λυσίμετρο	Evapotranspiration rate, measured by lysimeter	g t^{-1}
ET_o	Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς	Reference evapotranspiration	mm t^{-1}
E_{use}	Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού	Water effective use	%
F	Φθορισμός φυτών ή φθορισμός χλωροφύλλης	plant fluorescence ή chlorophyll fluorescence	W m^{-2}
G	Ροή θερμότητας προς το έδαφος	Soil heat flow	$\text{MJ m}^{-2} \text{ t}^{-1}$

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Μονάδα μέτρησης
g_a	Χονδρική αεροδυναμική αγωγιμότητα	Bulck aerodynamic conductivity	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
g_M	Μέγιστη αγωγιμότητα φυτοκάλυψης	Maximum canopy conductivity	Mm s^{-1}
I_{LA}	Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	Leaf area index	m^2 φύλλου m^{-2} εδάφους
IV	Όγκος νερού άρδευσης	Irrigation water volume	L
K_c	Φυτικός συντελεστής	Crop coefficient	-
L	Μήκος φύλλου	Leaf length	cm
mV	Σήμα αισθητήρα	Sensor voltage	mV
P_o	Πίεση κορεσμένων ατμών	Saturated vapour pressure	kPa
Q_w	Ροή του νερού στο έδαφος	Soil water flow	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων	Specific gas constant	J MT^{-1}
R###	Ανακλώμενη ακτινοβολία σε μήκος κύματος ###nm	Reflected radiation at ##nm, wavelength	nm
r_a	Αεροδυναμική αντίσταση	Aerodynamic resistance	s m^{-1}
$R_{G,i}$	Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία	Incoming solar radiation (in the greenhouse)	W m^{-2}
$R_{G,o}$	Εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία	Outside solar radiation	W m^{-2}
R_{Go}	Ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο της ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου	Time integral of outside solar radiation	kJ m^{-2}
RH	Σχετική υγρασία αέρα	Air relative	%

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Μονάδα μέτρησης
r_{HR}	Αντίσταση στην μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας και ακτινοβολίας	humidity Heat and radiation energy resistance	$s\ m^{-1}$
r_{leaf}	Αντίσταση του φύλλου στην κίνηση του νερού	Leaf resistance	$S\ m^{-1}$
R_n	Καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας	Net solar radiation at canopy level	$MJ\ m^{-2}\ t^{-1}$
$R_{n,int}$	Καθαρή απορροφούμενη ακτινοβολία από το φυτό	Net intercepted by the plant radiation	$W\ m^{-2}$
R_{ni}	Ισόθερμη καθαρή ακτινοβολία	Isothermic net radiation	$W\ m^{-2}$
R_{ns}	Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος εντός του θερμοκηπίου	Net shortwave solar radiation inside greenhouse	$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$
R_s	Ηλιακή ακτινοβολία	Solar radiation	$W\ m^{-2}$
r_s	Αντίσταση επιφάνειας του φύλλου	Canopy resistance	$S\ m^{-1}$
r_{sl}	Αντίσταση στην κίνηση του νερού κατά τη διαδρομή από το υπόστρωμα έως το φύλλο	Soil to leaf resistance	$S\ m^{-1}$
R_{soil}	Αντιστάσεις στην κίνηση νερού στο έδαφος	Resistances in water movement in soil	$s\ m^{-1}$
RU	Αρχικές μονάδες σήματος αισθητήρα	Sensor output in raw units	-
RV	Όγκος απορροής	Leaching volume	L
RWC	Σχετικό περιεχόμενο	Relevant plant	%

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Μονάδα μέτρησης
	φυτικού ιστού σε νερό	water content	
S	Εμβαδόν φύλλου	Leaf area	cm ²
S _e	Ενεργός κορεσμός	Effective saturation	kPa
T _a	Θερμοκρασία αέρα	Air temperature	°C
T _{abs}	Απόλυτη θερμοκρασία	Absolute temperature	°K
T _{abs}	Απόλυτη θερμοκρασία	Absolute temperature	°K
T _c	Θερμοκρασία της κόμης της καλλιέργειας	Canopy temperature	°C
T _i	Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα	Internal air temperature	°C
T _l	Θερμοκρασία φύλλου	Leaf temperature	°C
T _m	Ελάχιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να φτάσει η κόμη της καλλιέργειας	Minimum canopy temperature	°C
T _r	Διαπνοή της καλλιέργειας	Cultivation transpiration	kg m ⁻²
T _M	Μέγιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να φτάσει η κόμη της καλλιέργειας	Maximum canopy temperature	°C
u ₂	Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m	Air speed at 2m height	m s ⁻¹
V _{mol}	Μερικός μοριακός όγκος νερού	Water molecular volume	cm ³ M ⁻¹
VPD	Έλλειμμα πίεσης κορεσμού	Vapor pressure deficit	kPa
V _s	Συνολικός όγκος υποστρώματος	Total substrate volume	L
V _w	Όγκος νερού που περιέχεται σε ένα	Volume of water inside the substrate	L

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Μονάδα μέτρησης
	υπόστρωμα		
W	Πλάτος φύλλου	Leaf width	cm
WBC	Ρυθμιστική	Water Buffering	%
	περιεκτικότητα νερού	Capacity	
W_d	Νερό που μεταφέρεται στην περιοχή που αρδεύεται	Water volume that is supplied to the area	m^3
W_u	Νερό χρησιμοποιείται ωφέλιμα	Usefully used water volume	m^3
α	Συντελεστής εξάτμισης	Evaporation coefficient	-
γ	Ψυχομετρική σταθερά	Psychrometric constant	$Pa \text{ } ^\circ C^{-1}$
Δ	Κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών	Slope of saturation vapour pressure curve	$kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$
ε	Διηλεκτρική αγωγιμότητα	Dielectric permittivity	-
ζ	Ειδικός συντελεστής υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής	Evapotranspiration coefficient	-
θ	Υγρασία υποστρώματος	Soil water content	$\% \text{ } v \text{ } v^{-1}$
θ_{cc}	Υδατοϊκανότητα φυτοδοχείου	Container capacity	%
λ	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης	Latent heat of evaporation	$MJ \text{ } kg^{-1}$
ρ_a	Μέση πυκνότητα του αέρα	Mean air density	$kg \text{ } m^{-3}$
σ	Σταθερά Stefan-Boltzman	Stefan-Boltzman constant	$MJ \text{ } m^{-2} \text{ } K^{-4} \text{ } day^{-1}$
τ	Περατότητα του καλύμματος του θερμοκηπίου στην	Covering material permeability to solar radiation	%

Σύμβολο	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος	Μονάδα μέτρησης
	ηλιακή ακτινοβολία		
Ψ	υδατικό δυναμικό	Water potential	kPa
Ψ_{leaf}	Υδατικό δυναμικό του φύλλου	Leaf water potential	kPa
Ψ_m	Δυναμικό πλέγματος	Matric potential	kPa
Ψ_p	Δυναμικό σπαργής	Turgor potential	kPa
Ψ_s	Οσμωτικό δυναμικό	Osmotic potential	kPa
Ψ_{soil}	Υδατικό δυναμικό του εδάφους	Soil water potential	kPa
Ψ_w	Ολικό υδατικό δυναμικό των φυτικών ιστών	Total crop water potential	kPa

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Θερμοκηπιακές καλλιέργειες

Η έκταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών αυξάνεται συστηματικά με την πάροδο του χρόνου στην περιοχή της Μεσογείου μια και αποτελεί την πλέον παραγωγική μορφή πρωτογενούς αγροτικής παραγωγής. Στην Ελλάδα περισσότερα από 56.000 στρέμματα καλύπτονται από περισσότερες από 10.000 θερμοκηπιακές μονάδες όπου απασχολούνται σχεδόν 25.000 εργάτες. Η έκταση αυτή αυξάνεται χρόνο με το χρόνο με ένα ρυθμό περίπου 1.500 στρέμματα / έτος (ΕΣΥΕ, 2011). Ορισμένοι από τους λόγους που οδηγούν σε αυτή τη συνεχή αύξηση είναι οι ακόλουθοι: (i) ακραίες και απρόβλεπτες κλιματικές συνθήκες ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, (ii) μειωμένη διαθεσιμότητα νερού, που αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμο σημείο κυρίως για την περιοχή της Μεσογείου, (iii) μόλυνση του περιβάλλοντος και προβλήματα ποιότητας και ασφάλειας τροφίμων και (iv) ικανότητα των θερμοκηπίων να παρέχουν παραγωγή υψηλής ποιότητας καθόλη τη διάρκεια του έτους.

Η άρδευση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες καλλιεργητικές φροντίδες στα θερμοκήπια. Οι σχετικές πρακτικές που ακολουθούνται στην περιοχή της Μεσογείου βασίζονται ακόμη σε μεγάλο ποσοστό στην εμπειρία των καλλιεργητών με αποτέλεσμα να καταγράφονται μεγάλες διακυμάνσεις στη ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται. Η προβληματική διαχείριση των αρδεύσεων δεν οδηγεί μόνο σε κατασπατάληση του πολύτιμου φυσικού πόρου που ονομάζεται νερό αλλά και την επιβάρυνση των οικοσυστημάτων με λιπάσματα μέσω της απορροής καθώς και την κακή οικονομική απόδοση των καλλιεργειών (αύξηση κατανάλωσης ενέργειας, αύξηση προβλημάτων από ασθένειες κοκ). Ο αποτελεσματικός έλεγχος των αρδεύσεων στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες βελτιστοποιεί την ποσότητα και την ποιότητα της παραγωγής ενώ μειώνει στο ελάχιστο τις εισόδους στο σύστημα καλλιέργειας.

Ανάγκες θερμοκηπιακών καλλιεργειών σε νερό

Τα φυτά απαιτούν επαρκή ποσότητα νερού ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη ανάπτυξη, παραγωγή και ποιότητα καρπών. Το νερό εξασφαλίζει ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών των φυτικών οργανισμών (Jolliet, 1999) καθώς:

- αποτελεί περίπου το 70% έως 95% του νωπού τους βάρους και τους δίνει το σχήμα και την απαραίτητη ακαμψία,

- χρησιμοποιείται ως μέσο διάλυσης και πηγής ιόντων, είναι το μέσο μεταφοράς των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος στο φυτό και είναι απαραίτητο σε πολλές βιοχημικές αντιδράσεις, ενώ
- λόγω της μεγάλης του ειδικής θερμότητας, το νερό ψύχει τα φύλλα και προλαμβάνει την υπερθέρμανσή τους.

Το νερό εισέρχεται στα φυτά μέσω του ριζικού συστήματος και εξέρχεται ως υδρατμός μέσω των φύλλων, έτσι η συγκέντρωση του νερού στα φυτά εξαρτάται από δύο κύριους παράγοντες:

- τη διαθεσιμότητα του νερού στο υπόστρωμα και την απορρόφησή του από τις ρίζες και
- τον ρυθμό εξάτμισης του νερού από τα φύλλα, δηλαδή τη διαπνοή.

Επομένως εάν στοχεύουμε στην ολοκληρωμένη διαχείριση της υδατικής κατάστασης των φυτών στο χώρο του θερμοκηπίου (είτε πρόκειται για παραγωγικές καλλιέργειες, είτε για φυτεύσεις ενταγμένες σε έργα πράσινου π.χ. θερμοκήπια βοτανικών κήπων) θεωρητικά θα πρέπει εκτός από τον προγραμματισμό της άρδευσης να ελέγχουμε και τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν το εναέριο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου και μέσω αυτών την εξατμισοδιαπνοή.

Σε περίπτωση άστοχης διαχείρισης προκαλείται υδατική καταπόνηση η οποία επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία και την ανάπτυξη των φυτών. Για να αποφευχθεί η υδατική καταπόνηση απαιτείται η εφαρμογή κάποιας στρατηγικής για τον έλεγχο των αρδευτικών γεγονότων. Σε αυτό το πλαίσιο έχουν αναπτυχθεί από απλές εμπειρικές πρακτικές έως πολύπλοκα συστήματα διαχείρισης.

Συστήματα ελέγχου άρδευσης

Πέρα από τον απλό υπολογιστικό προγραμματισμό των αρδευτικών γεγονότων και την εμπειρική ρύθμιση του συστήματος κατά την εφαρμογή των προγραμμάτων, σε περιπτώσεις βελτιωμένων συστημάτων χρησιμοποιούνται ενδείξεις που σηματοδοτούν την έναρξη της άρδευσης σε συνδυασμό με υπολογισμό της αρδευτικής δόσης. Έτσι για παράδειγμα:

- η ένδειξη τενσιομέτρων ή άλλων αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας μπορεί να σηματοδοτήσει την έναρξη και την λήξη της άρδευσης,
- η υπολογισμένη δόση άρδευσης μπορεί να χορηγείται ανά διαστήματα που καθορίζονται από το χρονικό ολοκλήρωμα της ολικής ακτινοβολίας (ενέργεια) που δέχεται η καλλιέργεια ή της απώλειας νερού από αυτή (εξατμισοδιαπνοή) όπως υπολογίζεται από συνδυασμό περιβαλλοντικών δεδομένων (ηλιακή ακτινοβολία, έλλειμα πίεσης κορεσμού κοκ) και

- η μέτρηση από απόσταση χαρακτηριστικών των φυτών όπως η θερμοκρασία και η ανάκλαση μπορούν να δώσουν ένδειξη σχετικά με το επίπεδο υδατικής καταπόνησης.

Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα ελέγχου άρδευσης, μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- συστήματα χωρίς ανατροφοδότηση (open loop) και
- συστήματα με ανατροφοδότηση (closed loop - feedback).

Στην πρώτη κατηγορία αφού σηματοδοτηθεί η έναρξη του αρδευτικού γεγονότος απλά παρέχεται η προκαθορισμένη ποσότητα νερού χωρίς το αποτέλεσμα της επέμβασης να συμμετέχει στον έλεγχο της διαδικασίας. Στην δεύτερη περίπτωση το σύστημα ελέγχει το χρόνο άρδευσης χρησιμοποιώντας κάποιο αποτέλεσμα της επέμβασης π.χ. το ποσοστό απορροής ή την αύξηση της υγρασίας του εδάφους. Τέλος υπάρχουν και συστήματα με πρόβλεψη (feed forward) που προσπαθούν να προβλέψουν την υδατική κατάσταση του φυτού ώστε να αποφασίσουν σχετικά με το πρόγραμμα άρδευσης.

Σε όλες τις περιπτώσεις απαιτείται κάποιος απλός ή συνδυαστικός «δείκτης» για την έκφραση της υδατικής κατάστασης του φυτού. Ο «δείκτης» αυτός στην πιο πετυχημένη έκφρασή του θα μπορούσε να αποτελεί βάση για το σύνολο των ενεργειών ελέγχου του συστήματος (on-off, feedback, feed forward).

Η ανάπτυξη νέων βελτιωμένων συστημάτων διαχείρισης της άρδευσης πέρα από την αυξημένη παραγωγικότητα έχει στις μέρες μας και μία ακόμη σημαντική συνιστώσα, αυτή της προστασίας του περιβάλλοντος μέσω της αναμενόμενης μείωσης της ποσότητας νερού που απορρέει από το θερμοκήπιο και επιβαρύνει το περιβάλλον (αφού συνήθως περιέχει λιπάσματα και φυτοφάρμακα).

Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Το σύνολο σχεδόν των μετρήσεων -και εν συνεχεία των παραγόμενων δεικτών- που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη διαχείριση της άρδευσης σε φυτεύσεις υπό κάλυψη έχουν ως βασικά μειονεκτήματα ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- μεγάλη χρονική υστέρηση όσο αφορά τον εντοπισμό της καταπόνησης,
- έμμεση φύση της μέτρησης,
- αβεβαιότητα σχετικά με το κατά πόσο είναι αντιπροσωπευτικό το αποτέλεσμα εξαιτίας των σημειακών μετρήσεων,
- ανάγκη για επαφή των αισθητήρων με κάποιο τμήμα του φυτού,
- ανάγκη για καταστροφή τμήματος ή συνόλου του φυτού,
- πολυπλοκότητα εφαρμογής,

- υψηλό κόστος εξοπλισμού και λήψης μετρήσεων,
- δυσκολίες στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης μετρήσεων,
- δυσκολία στη συμβατότητα με νέες τεχνικές καλλιέργειας όπως η υδροπονία σε υποστρώματα.

Με βάση αυτά τα δεδομένα συμπεραίνουμε ότι ενώ η διαχείριση της άρδευσης θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα ώριμο πεδίο έρευνας -πολλά από τα αποτελέσματα της οποίας έχουν ήδη εφαρμοστεί στην παραγωγή- νέες προοπτικές έρευνας έχουν δημιουργηθεί σχετικά με τη χρήση μεθόδων που μετρούν την υδατική κατάσταση των φυτών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικό επίπεδο για τη διαχείριση της άρδευσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιστημονική έρευνα με στόχο την ανάπτυξη μεθόδων που θα χρησιμοποιούν αισθητήρες οι οποίοι δεν θα έρχονται σε επαφή και δεν θα καταστρέφουν την καλλιέργεια, θα είναι οικονομικοί, θα είναι εύκολοι στη χρήση, θα εκφράζουν την υδατική κατάσταση του συνόλου της καλλιέργειας και φυσικά οι μετρήσεις τους θα μετουσιώνονται σε δείκτες που θα εκφράζουν άμεσα την υδατική κατάσταση των φυτών.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο οι «οπτικές μέθοδοι» (ουσιαστικά τηλεπισκόπηση της καλλιέργειας και ανάλυση της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε διάφορες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) έχουν μεγάλη πιθανότητα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή της υδατικής αλλά και της γενικότερης φυσιολογικής κατάστασης παραγωγικών καλλιεργειών ενώ πληρούν σχεδόν το σύνολο των απαιτήσεων που αναφέρθηκαν. Επομένως εάν μελετηθεί η φασματική απόκριση (εκπομπή – ανάκλαση ακτινοβολίας) των καλλιεργειών σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης είναι πιθανό να βρεθούν συσχετίσεις που θα χρησιμοποιηθούν για στην πράξη για τη διαχείριση της άρδευσης και άλλων λειτουργιών (ιδιαίτερα συστημάτων δροσισμού) που επηρεάζουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου.

Βασικός σκοπός διατριβής αυτής είναι η ανάπτυξη δεικτών υδατικής κατάστασης του φυτού που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση της άρδευσης ως μιας καλλιεργητικής εργασίας που επηρεάζεται από το σύνολο των παραγόντων του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό:

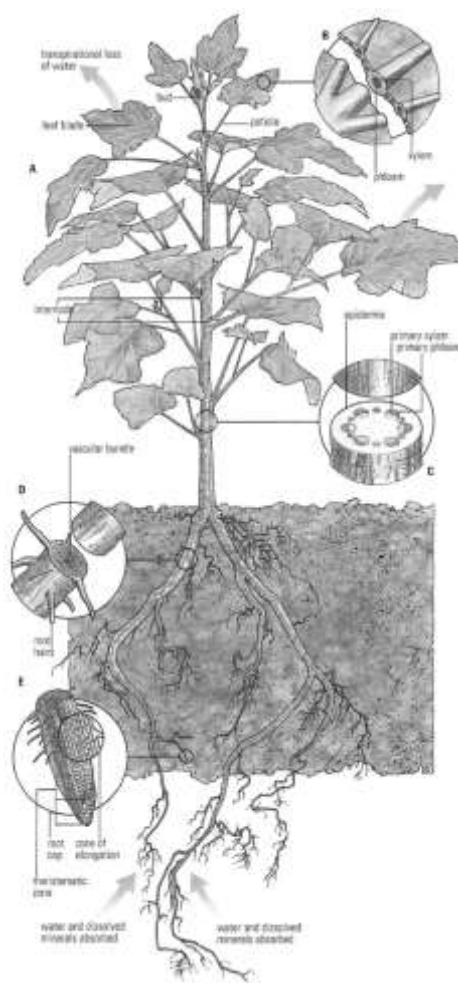
- γίνεται αξιολόγηση μίας σειράς υφιστάμενων και νέων δεικτών υδατικής κατάστασης του φυτού που βασίζονται σε δεδομένα που προέρχονται από ανάκλαση ακτινοβολίας από την καλλιέργεια, με σκοπό τον εντοπισμό αυτών που μπορούν να έχουν πρακτική εφαρμογή για την αυτοματοποιημένη διαχείριση της άρδευσης σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες,

- μελετάται η απόκριση υφιστάμενων αισθητήρων που σχετίζονται με την υδατική κατάσταση του υποστρώματος σε συνθήκες υδροπονικών καλλιεργειών στο θερμοκήπιο και
- γίνεται αναφορά στη δυνατότητα αυτόματου ελέγχου της άρδευσης μέσω μέτρησης παραμέτρων του εναέριου περιβάλλοντος και του ριζοστρώματος σε θερμοκήπια που εντάσσονται σε έργα πράσινου (π.χ. σε βοτανικούς κήπους).

Κεφάλαιο 2 - Θεωρητική ανάλυση

Υδατικές σχέσεις

Το νερό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών. Το νερό ουσιαστικά «ρέει» μέσω του φυτού –το οποίο χρησιμοποιεί λιγότερο του 2% της ποσότητας που διακινείται- από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα. Για την περιγραφή αυτής της κίνησης του νερού έχει αναπτυχθεί η προσέγγιση του συνεχούς «υποστρώμα – φυτό – ατμόσφαιρα» (SPAC: soil – plant – atmosphere continuum). Βασικοί παράγοντες της ροής αποτελούν η λειτουργία του υποστρώματος ως δεξαμενής αποθήκευσης νερού, οι αντιστάσεις του υποστρώματος, του φυτού και της ατμόσφαιρας στην κίνηση του νερού προς την ατμόσφαιρα καθώς και οι βασικές κινητήριες κλιματικές δυνάμεις (η ηλιακή ακτινοβολία (R_s) και το έλλειμμα πίεσης κορεσμού (VPD)).



Εικόνα 1 Σχηματική απεικόνιση της κίνησης του νερού στα φυτά (Darling, 2008)

Η ροή επιτυγχάνεται μέσω διαφορών στο υδατικό δυναμικό (water potential) το οποίο καθορίζει την όλη διαδικασία. Το υδατικό δυναμικό εκφράζει τη λανθάνουσα ενέργεια του νερού σε σχέση με το απιονισμένο νερό υπό συνθήκες αναφοράς (standard conditions)¹. Με τον τρόπο αυτό ποσοτικοποιεί την τάση του νερού να κινηθεί από ένα σημείο προς ένα άλλο λόγω φαινομένων όπως η όσμωση, η βαρύτητα, η μηχανική πίεση και οι επιδράσεις πλέγματος ύλης (matrix effects) όπως είναι η επιφανειακή τάση και οι δυνάμεις συνοχής. Το υδατικό δυναμικό εκφράζεται σε μονάδες πίεσης και συμβολίζεται με το γράμμα Ψ. Το απιονισμένο νερό υπό συνθήκες αναφοράς θεωρείται ότι έχει υδατικό δυναμικό ίσο με 0. Η διάλυση ουσιών σε αυτό μειώνει το δυναμικό του ενώ η αύξηση της πίεσης το αυξάνει. Εάν υπάρχει ελεύθερη οδός, το νερό θα κινηθεί από σημεία μεγαλύτερου δυναμικού προς σημεία με μικρότερο –πράγμα που συμβαίνει και εντός των φυτικών ιστών-. Η κίνηση αυτή πρέπει σε κάθε περίπτωση να υπερκεράσει μία σειρά από αντιστάσεις και εκφράζεται από τη γενική εξίσωση (Löfkvist, 2010):

$$Q_w = \frac{\Delta\Psi}{R}$$

Εξίσωση 1 Υπολογισμός ροής νερού στο υπόστρωμα

όπου:

Q_w είναι η ροή του νερού,

$\Delta\Psi$ είναι η διαφορά στο υδατικό δυναμικό και

R είναι οι αντιστάσεις κατά τη διαδρομή

Το ολικό υδατικό δυναμικό των φυτικών ιστών (Ψ_w) καθορίζει τελικά την διεύθυνση και τη φορά και συμβάλει στην ένταση της ροής του νερού, και χρησιμοποιείται ως δείκτης της υδατικής κατάστασης του φυτού. Το δυναμικό αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως άθροισμα τριών βασικών επιμέρους δυναμικών (Slatyer, 1967):

¹ Πρόκειται για συγκεκριμένα ζεύγη τιμών θερμοκρασίας και πίεσης που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο πειραματικών μετρήσεων στις φυσικές επιστήμες με στόχο να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συνόλων δεδομένων. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα πρότυπα συνθηκών αναφοράς είναι αυτά της International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) και του National Institute of Standards and Technology (NIST). Η τρέχουσα έκδοση του πρότυπου της IUPAC είναι: θερμοκρασία 0°C (273,15 K) και απόλυτη πίεση 100 kPa (0,986 atm), ενώ σύμφωνα με το NIST: θερμοκρασία 20°C (293.15 K) και απόλυτη πίεση 101,325 kPa (1 atm).

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

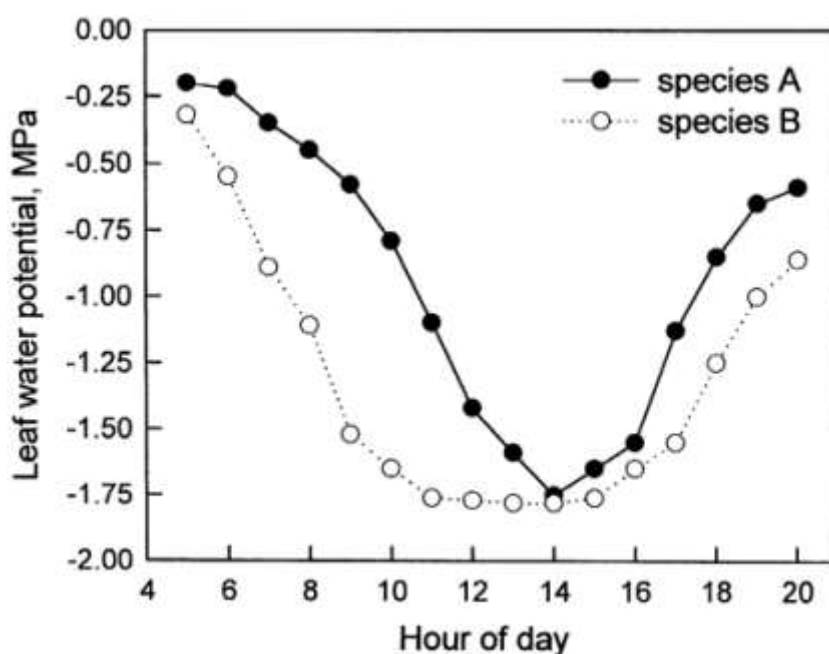
Εξίσωση 2 Υδατικό δυναμικό²

όπου (όλες οι ποσότητες σε kPa):

Ψ_s είναι το οσμωτικό δυναμικό (οσμωτική πίεση των κυττάρων) που οφείλεται στα συστατικά που είναι διαλυμένα στο νερό των κυττάρων και έχει αρνητικές τιμές,

Ψ_p είναι το δυναμικό σπαργής ή πίεσης που οφείλεται στην ανάπτυξη υδροστατική πίεσης στα τοιχώματα των κυττάρων και έχει συνήθως θετικές τιμές για τα κύτταρα (εκτός από αυτά του ξύλου) και

Ψ_m είναι το δυναμικό πλέγματος που οφείλεται στην ελεύθερη ενέργεια του νερού λόγω της θέσης του στα ενδιάμεσα των κολοειδών δομών του κυττοπλάσματος και έχει αρνητικές τιμές.



Εικόνα 2 Ημερήσια διακύμανση υδατικού δυναμικού φύλλου για δύο διαφορετικά είδη φυτών κατά τη διάρκεια μίας τυπικής καλοκαιρινής ημέρας στην περιοχή της Μεσογείου (Salleo και Nardini, 2003)

Το υδατικό δυναμικό μπορεί να μετρηθεί σε διάφορους τύπους φυτικού ιστού. Στα περισσότερα φυτά το υδατικό δυναμικό των φύλλων ή των βλαστών ακολουθεί έναν ημερήσιο κύκλο μείωσης και επαναφοράς ο οποίος οφείλεται σε αλλαγές στα χαρακτηριστικά του SPAC (Εικόνα 2). Υπό κανονικές συνθήκες (μέσο VPD και όχι

² Μία περισσότερο ολοκληρωμένη έκφραση του υδατικού δυναμικού περιλαμβάνει και τα: Ψ_o : διόρθωση αναφοράς, Ψ_{π} : δυναμικό διαλυμένων ουσιών και Ψ_n δυναμικό υγρασίας.

περιοριστική υγρασία υποστρώματος) το Ψ μειώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας φθάνοντας σε ένα ελάχιστο τις πρώτες απογευματινές ώρες και στην συνέχεια επανακάμπτει φθάνοντας σε ένα μέγιστο λίγο πριν την αυγή (Εικόνα 2)³.

Μια μαθηματική έκφραση του υδατικού δυναμικού των φύλλων (Ψ_{leaf}) είναι η ακόλουθη (Hinckley κ.α., 1978; Riggs κ.α., 1991):

$$\Psi_{leaf} = \Psi_{soil} - \left(\frac{VPD}{r_{leaf}} \right) \cdot r_{sl}$$

Εξίσωση 3 Υδατικό δυναμικό φύλλου

όπου:

Ψ_{leaf} , Ψ_{soil} το υδατικό δυναμικό του φύλλου και του εδάφους αντίστοιχα (kPa)

VPD το έλλειμμα πίεσης κορεσμού (kPa)

r_{leaf} η αντίσταση του φύλλου στην κίνηση του νερού ($s \cdot m^{-1}$)

r_{sl} η αντίσταση στην κίνηση του νερού κατά τη διαδρομή από το υπόστρωμα έως το φύλλο (soil to leaf) ($s \cdot m^{-1}$)

Εκτίμηση αναγκών των φυτών σε νερό – υδατική καταπόνηση

Ο βέλτιστος προγραμματισμός της άρδευσης συντελεί στον επαρκή εφοδιασμό των φυτών με νερό και θρεπτικά συστατικά, την αποφυγή συνθηκών καταπόνησης και την μεγάλη αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (Raviv και Blom, 2001). Η διαχείριση της άρδευσης αφορά τον καθορισμό της συχνότητας και της διάρκειας των αρδευτικών γεγονότων. Ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο αυτό έχει η εκτίμηση των αναγκών των φυτών σε νερό.

Όπως είναι γνωστό η συνολική ποσότητα νερού που μεταβαίνει στην ατμόσφαιρα από τη φυτική μάζα και το υπόστρωμα (εξατμισοδιαπνοή) συμβάλλει στην εκτίμηση της ποσότητας του νερού που πρέπει να δοθεί στο υπόστρωμα μέσω του αρδευτικού συστήματος. Στην εκτίμηση αυτή πρέπει να ληφθούν ακόμη υπόψη μια σειρά από άλλοι παράγοντες με σημαντικότερο την αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού.

Όσο αφορά την εξατμισοδιαπνοή λόγω του ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει δυνατότητα άμεσου προσδιορισμού, έχουν αναπτυχθεί διάφορα υπολογιστικά μοντέλα εκτίμησής της –από εμπειρικά-στατιστικά μοντέλα έως πολύπλοκες σχέσεις με ισχυρό φυσικό υπόβαθρο-. Στην εποχή μας, για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο μία

³ Την αυγή το δυναμικό έχει την μεγαλύτερη τιμή (μικρότερη αρνητική τιμή ουσιαστικά) και η τιμή του αυτή μπορεί να θεωρηθεί μία λογική εκτίμηση της τιμής του υδατικού δυναμικού του εδάφους (Blad και Walter-Shea, 2008).

τυποποιημένη και κοινά αποδεκτή μεθοδολογία (Allen κ.α., 1998)⁴ η οποία στηρίζεται στις ακόλουθες προϋποθέσεις (Pittenger και Shaw, 2004):

- συνεχής επάρκεια άρδευσης χωρίς περιορισμούς στην διαθέσιμη υγρασία του υποστρώματος,
- έντονη και υγιής ανάπτυξη των φυτών,
- σχηματισμός ομοιόμορφης –πρακτικά συνεχούς- κάλυψης που μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως ένα μεγάλο φύλλο,
- καλλιέργεια με σκοπό την βέλτιστη παραγωγή και
- απαιτήσεις σε νερό σε γραμμική αναλογία με τον ρυθμό της ET₀.

Η προσέγγιση αυτή είναι αποτέλεσμα της ενεργειακής μεθόδου Penman-Monteith (Allen κ.α., 1998) σύμφωνα με την οποία η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (που αντιστοιχεί στη ροή λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης λET) βασίζεται στον υπολογισμό των παραγόντων του ενεργειακού ισοζυγίου όπως εκφράζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$R_n = \lambda ET + H + G$$

Εξίσωση 4 Ενεργειακό ισοζύγιο εξατμισοδιαπνοής

όπου η διαθέσιμη καθαρή ενέργεια της ακτινοβολίας (R_n - net radiant energy) μοιράζεται μεταξύ της ροής θερμότητας στο έδαφος (G - soil heat flux) και των ατμοσφαιρικών επαγωγικών ροών (ροή αισθητής θερμότητας H και ροή λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης λET).

Η ανάλυση των παραγόντων της βασικής αυτής σχέσης οδηγεί στη διαμόρφωση μίας εξίσωσης υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (Allen κ.α., 1998, Allen κ.α., 2011α, Allen κ.α., 2011β):

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

Εξίσωση 5 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής (Penman-Monteith)

όπου:

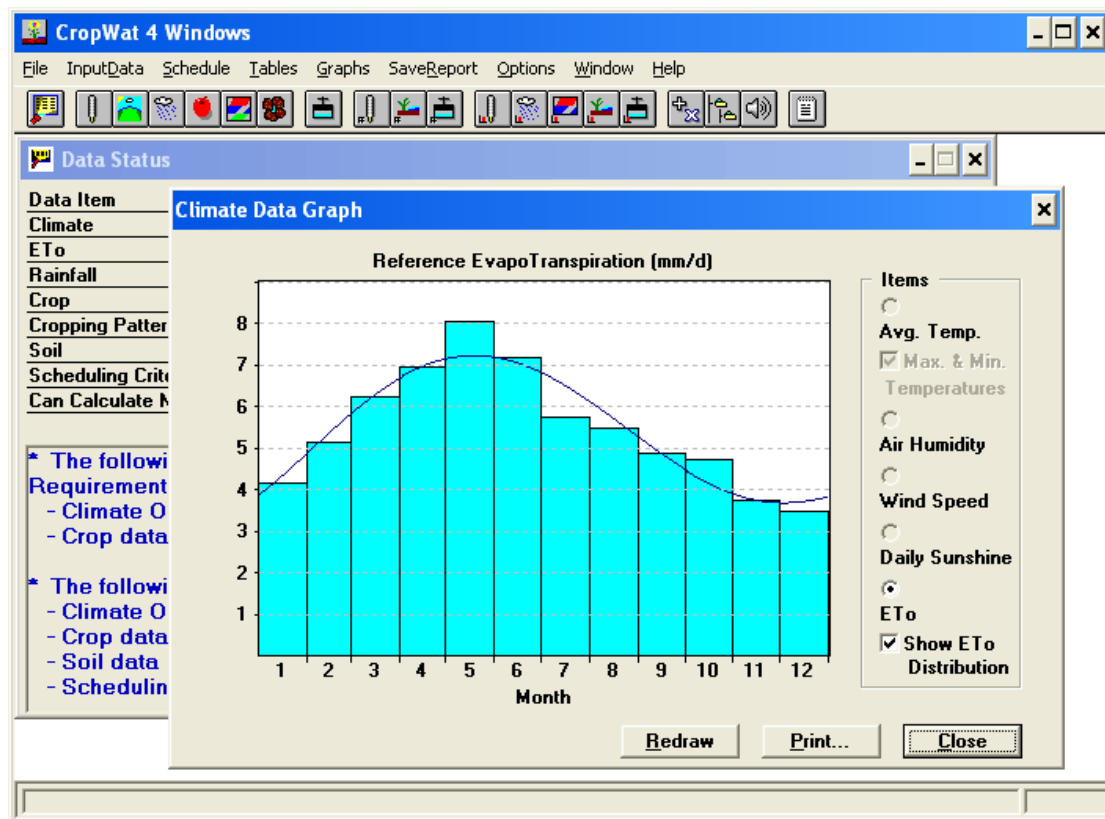
- λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ kg^{-1}),
 ET η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm t^{-1}),

⁴ Για την εκτίμηση της ET₀ απαιτούνται μετεωρολογικά δεδομένα όπως η καθαρή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου. Αυτά μετριοούνται με πολλών ειδών αισθητήρες. Χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους αισθητήρες για την μέτρηση T, RH και PAR (Photosynthetically Active Radiation) βασίζονται στην ασύρματη τεχνολογία RFID. Τέτοιοι θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε ένα πάρκο για τη συνεχή καταγραφή σχετικών δεδομένων.

- R_n η καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$),
 G η ροή θερμότητας προς το έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$),
 c_p η ειδική θερμότητα αέρα υπό σταθερή πίεση ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$),
 ρ_a η μέση πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}),
 Δ η κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),
 γ η ψυχρομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),
 $e_s - e_a$ το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών του αέρα (VPD), e_s η πίεση υδρατμών στο κορεσμό (για θερμοκρασία αέρα) (kPa) και e_a η πίεση υδρατμών (για θερμοκρασία αέρα) (kPa),
 r_s, r_a η αντίσταση επιφάνειας του φύλλου (ή αντίσταση φύλλου) και η αεροδυναμική αντίσταση της καλλιέργειας (s m^{-1}),

Η μεθοδολογία αυτή στοχεύει στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής για γεωργικές καλλιέργειες. Σε πρακτικές εφαρμογές υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς που αναφέρεται σε συγκεκριμένη φυτική επιφάνεια αναφοράς, αποτελώντας έτσι ουσιαστικά ένα σύνθετο κλιματικό παράγοντα. Στην συνέχεια η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εκτιμάται πολλαπλασιάζοντας την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με κατάλληλους φυτικούς συντελεστές που εξαρτώνται από το είδος και το στάδιο ανάπτυξης του φυτού καθώς και την καλλιεργητική τεχνική που ακολουθείται⁵. Μάλιστα για την διευκόλυνση της χρήσης της μεθόδου έχει αναπτυχθεί και σχετικό λογισμικό (CROPWAT) από τον FAO (Εικόνα 3; FAO, 2008). Η προσπάθεια για δημιουργία νέων και για βελτίωση της ακρίβειας ή προσαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις των υφιστάμενων μεθόδων βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη. Σημαντική έρευνα έχει γίνει και όσο αφορά τη χρήση της μεθόδου των Allen κ.α. (1998) για υπό κάλυψη καλλιέργειες, σε γενικευμένο επίπεδο (Stanghellini, 1987; Prenger κ.α., 2002; Donatelli κ.α., 2006) αλλά και για την ειδική περίπτωση των θερμοκηπίων στην περιοχή της Μεσογείου (Orgaz, 2005; Mpusia, 2006; Katsoulas κ.α., 2006; Thompson κ.α., 2007).

⁵ Στο σχετικό οδηγό του FAO (Allen κ.α., 1998) περιλαμβάνονται φυτικοί συντελεστές K_c για πολλά καλλιεργούμενα φυτά.



Εικόνα 3 CROPWAT, πρόγραμμα για τον υπολογισμό εξατμισοδιαπνοής (FAO, 2008)

Η αποτελεσματικότητα της άρδευσης (Irrigation Efficiency - E_i) αποτελεί μέτρο της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται ωφέλιμα από τα φυτά. Η αποτελεσματικότητα προκύπτει από μετρήσεις και εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών του αρδευτικού συστήματος καθώς και των πρακτικών διαχείρισης που ακολουθούνται. Μια απλή έκφραση της αποτελεσματικότητας είναι ο λόγος της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται από τα φυτά ως προς την ποσότητα του νερού που εφαρμόζεται (Smajstrla κ.α., 1991)⁶:

⁶ Σε γεωργικές εφαρμογές για τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας αρδευτικών δικτύων χρησιμοποιούνται οι δείκτες WUE και IWUE, όμως και οι δύο αυτοί δείκτες συνδέονται με την παραγωγικότητα των φυτών. Σύμφωνα με τον Howell (2002) η WUE (Water Use Efficiency σε $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) εκφράζεται ως η παραγωγή (Y σε $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) ανά μονάδα εξατμισοδιαπνοής (ET σε mm). Η IWUE (Irrigation Water Use Efficiency σε $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ορίζεται ίση με $(Y - Y_d)/IRR$ όπου Y_d η παραγωγή από τμήματα που δεν αρδεύονται (σε $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) και IRR η εφαρμοζόμενη ποσότητα νερού (mm). Σύμφωνα με άλλους η IWUE υπολογίζεται αν διαιρέσουμε την παραγωγή με την ποσότητα του νερού άρδευσης ενώ η WUE αν την διαιρέσουμε με τη συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόζεται (άρδευση και βροχόπτωση).

$$E_{use} = 100 \times W_u / W_d$$

όπου:

- E_{use} η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού,
 W_u το νερό χρησιμοποιείται ωφέλιμα⁷ και
 W_d το νερό που μεταφέρεται στην περιοχή που αρδεύεται.

Θεωρητικά λοιπόν θα μπορούσε κάποιος με βάση υπολογιστικά μοντέλα και λαμβάνοντας υπόψη το μικροκλίμα, το είδος του φυτού, την ζητούμενη απορροή και τις ιδιότητες του υποστρώματος και την αποτελεσματικότητα να καταρτίσει ένα πρόγραμμα άρδευσης. Στην πραγματικότητα οι ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν σε κάθε καλλιέργεια έχουν ως συνέπεια ο προγραμματισμός να πρέπει να αναθεωρείται συνεχώς (συνήθως μέσω δοκιμών trial-error) ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στην τρέχουσα κάθε φορά κατάσταση.

Όταν η εφαρμογή ενός προγράμματος άρδευσης δεν επιτυγχάνει την κάλυψη των αναγκών των φυτών σε νερό τότε αυτά αργά ή γρήγορα θα βρεθούν υπό καθεστώς υδατικής καταπόνησης. Η υδατική καταπόνηση (water stress ή water deficit stress) είναι μία κατάσταση όπου το περιεχόμενο στο φυτό νερό βρίσκεται κάτω από τη βέλτιστη τιμή με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι φυσιολογικές λειτουργίες και η ανάπτυξή του. Άμεσο αποτέλεσμα της υδατικής καταπόνησης είναι η μείωση της στοματικής αγωγιμότητας (Liang κ.α., 1997; Cornic, 2000; Lawlor & Tezara, 2009) και του ρυθμού φωτοσύνθεσης (Chaves κ.α., 2002; Sarlikioti κ.α., 2010). Μεσοπρόθεσμα η αύξηση των κυττάρων, η γονιμοποίηση και η καρπόδεση επηρεάζονται πολύ πιο έντονα από κάθε άλλη διεργασία όταν το φυτό βρίσκεται υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης (Μιχελάκης, 1988).

Μέθοδοι ελέγχου της υδατικής κατάστασης των φυτών

Η διαδικασία της συνεχούς προσπάθειας προσαρμογής του προγράμματος άρδευσης στις πραγματικές απαιτήσεις της καλλιέργειας υποβοηθείται -και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αυτοματοποιηθεί- με τη χρήση ειδικών συσκευών (αισθητήρων) μέτρησης μεταβλητών του SPAC.

⁷ Η ωφέλιμη χρήση έχει πολλές έννοιες π.χ. χρήση από τα φυτά ώστε να επιτελούν τον επιζητούμενο σκοπό (ανάπτυξη, εμφάνιση κοκ), απομάκρυνση αλάτων, προστασία από παγετό κοκ σε αντιδιαστολή με την μη ωφέλιμη χρήση που είναι εξάτμιση κατά την εφαρμογή, απορροή και στράγγιση κάτω από το ενεργό ριζόστρωμα (Dukes, 2000).



Εικόνα 4 Χρήση τενσιόμετρων συνδεδεμένων σε αυτοματοποιημένο σύστημα για τη διαχείριση υποάρδευσης χρησιμοποιούν σε γλαστρικές καλλιέργειες με υπόστρωμα ελαφρόπετρα και υποάρδευση (POPRURA, 2008)

Μία πολύ απλή προσέγγιση ελέγχου της άρδευσης βασίζεται στον έλεγχο της απορροής. Οι Stanghellini και Van Meurs (1992) αξιολόγησαν τον δείκτη αυτό ως ιδιαίτερα αξιόπιστο.

Για πολλά εμπορικά συστήματα ο δείκτης ελέγχου είναι η ένδειξη αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων του υποστρώματος (έδαφος ή άλλο) όπως είναι:

- το υδατικό δυναμικό του εδάφους (soil matric potential - SMP)
- η διαθέσιμη υγρασία (available soil water content - AWC) και
- η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού νερού (soil water electric conductivity – SEC)

Ο πιο διαδεδομένος αισθητήρας μέτρησης του υδατικού δυναμικού είναι το τενσιόμετρο⁸ (Εικόνα 4). Η χρήση του ακόμη και σε υδροπονικές καλλιέργειες έχει ήδη μακρά ιστορία (Lieth και Oki, 2007). Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύχθηκε από τους Michels και Feyen (1984) ένα μοντέλο υδατικού ισοζυγίου για βελτιστοποίηση χρήσης τενσιόμετρων σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας, ενώ προσπάθεια για εύρεση των κατάλληλων τιμών ελέγχου για τα τενσιόμετρα έγινε και από τους Testezlaf κ.α. (1997) και Lieth και Oki (2007). Στο ίδιο γενικό πλαίσιο (μετρώντας όμως τιμές στον άλλο άξονα του διαγράμματος της χαρακτηριστικής καμπύλης

⁸ Ο δείκτης αυτός είναι έμμεσος καθώς εκφράζει το υδατικό δυναμικό του υποστρώματος και όχι αυτό της καλλιέργειας.

υγρασίας) κινούνται και οι αισθητήρες μέτρησης υγρασίας στο υπόστρωμα (έδαφος ή άλλο). Μάλιστα σχετικοί αισθητήρες έχουν ήδη εφαρμοστεί εδώ και χρόνια σε παραγωγικές συνθήκες (Grodan, 2010).

Άλλοι ερευνητές συνειδητοποιώντας την ανάγκη για άμεσες ενδείξεις της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας συνδύασαν την προσπάθεια δημιουργίας βέλτιστων υδατικών συνθηκών στο υπόστρωμα με αισθητήρες μέτρησης της διαπνοής από τα φύλλα (Hettiaratchi και Ahmed, 1991; Thompson κ.α., 2007). Η χρήση μετρήσεων της εξατμισοδιαπνοής με ευαίσθητους λυσιμετρικούς ζυγούς ακριβείας με σκοπό να αποτελέσουν τμήμα του συστήματος ελέγχου έχει μελετηθεί σε βάθος από τους Meijer κ.α. (1985). Οι Stanghellini και Van Meurs (1992) θεώρησαν την εξατμισοδιαπνοή ως βασικό δείκτη της κατάστασης της καλλιέργειας και προσπάθησαν, ορίζοντας επιθυμητά επίπεδα εξατμισοδιαπνοής (αντί για θερμοκρασίας και υγρασίας), να ελέγξουν τις βασικές παραμέτρους του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου.

Μείωση της εξατμισοδιαπνοής προκαλεί ελάττωση της δυνατότητας ψύχρανσης της φυλλικής επιφάνειας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της. Έτσι η διαφορά θερμοκρασίας αέρα και επιφάνειας και ακόμη καλύτερα η διαφορά της θερμοκρασίας της φυλλικής επιφάνειας από μία άριστη για τις δεδομένες συνθήκες τιμή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί – συσχετιστεί με το υδατικό περιεχόμενο και την υδατική καταπόνηση. Οι Jackson κ.α. (1981) εισήγαγαν για πρώτη φορά την έννοια του δείκτη υδατικής καταπόνησης (CWSI - Crop Water Stress Index) που βασίζεται στις μεταβολές της θερμοκρασίας των φύλλων σε σχέση με την υδατική τους κατάσταση.

$$CWSI = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m}$$

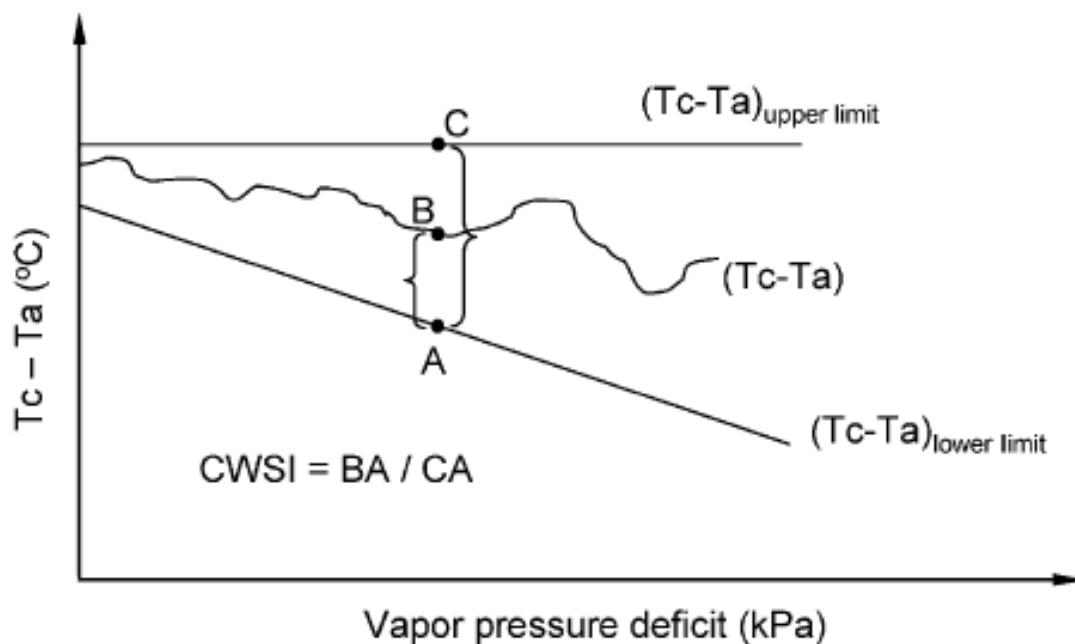
**Εξίσωση 7 Δείκτης υδατικής
καταπόνησης καλλιέργειας**

όπου:

- T_c η θερμοκρασία της κόμης της καλλιέργειας (°C)
- T_m η ελάχιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να φτάσει η κόμη της καλλιέργειας (°C) και
- T_M η μέγιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να φτάσει η κόμη της καλλιέργειας (°C)



Εικόνα 5 Οι ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών προκάλεσε κάψιμο στο φύλλο ζέρμπερας το οποίο έχει καλυφθεί από βαζελίνη ώστε να ανασταλεί η εξάτμιση



Εικόνα 6 Εμπειρική μέθοδος υπολογισμού του CWSI (Kacira et al. 2005) [T_c : θερμοκρασία φύλλου και T_a : θερμοκρασία αέρα]

Οι Idso κ.α. (1981) καθώς και ο Jones (1999 και 2004) πρότειναν διάφορες εκφράσεις του δείκτη αυτού. Για την εκτίμηση των θερμοκρασιακών ορίων που χρησιμοποιούνται στο δείκτη έχει γίνει εκτενής ερευνητική προσπάθεια. Ο Jones (1999) δοκίμασε τη χρήση ενός μη-διαπνέοντος (καλυμμένου με βαζελίνη - Εικόνα 5) και ενός υγρού φύλλου (ψεκασμένου με νερό) για την εύρεση τις μέγιστης και

ελάχιστης θερμοκρασίας φύλλου αντίστοιχα με σκοπό να απεμπλακεί από την ανάγκη για θεωρητικό υπολογισμό των τιμών αυτών. Απλουστευμένη προσέγγιση υπολογισμού του δείκτη αναφέρουν και οι Kacira κ.α. (2005) (Εικόνα 6). Οι Granta κ.α. (2006) αμφισβήτησαν την σταθερότητα της μεθόδου με τα φύλλα αναφοράς και συμπέραναν ότι είναι καλύτερα οι ακραίες θερμοκρασίες κόμης να υπολογίζονται μέσω εξισώσεων ενέργειας χρησιμοποιώντας μετρήσεις του περιβάλλοντος.

Σχέσεις για τον υπολογισμό των T_{\min} και T_{\max} μέσω κλιματικών δεδομένων παρατίθενται από τους Katsoulas κ.α. (2001) και (2002):

$$T_{\min} = T_i + \frac{(1/g_a + 1/g_M)R_{n,\text{int}} / \rho C_p - VPD / \gamma}{1 + \delta / \gamma + g_a / g_M}$$

**Εξίσωση 8 Θερμοκρασιακά
όρια φυλλικής επιφάνειας**

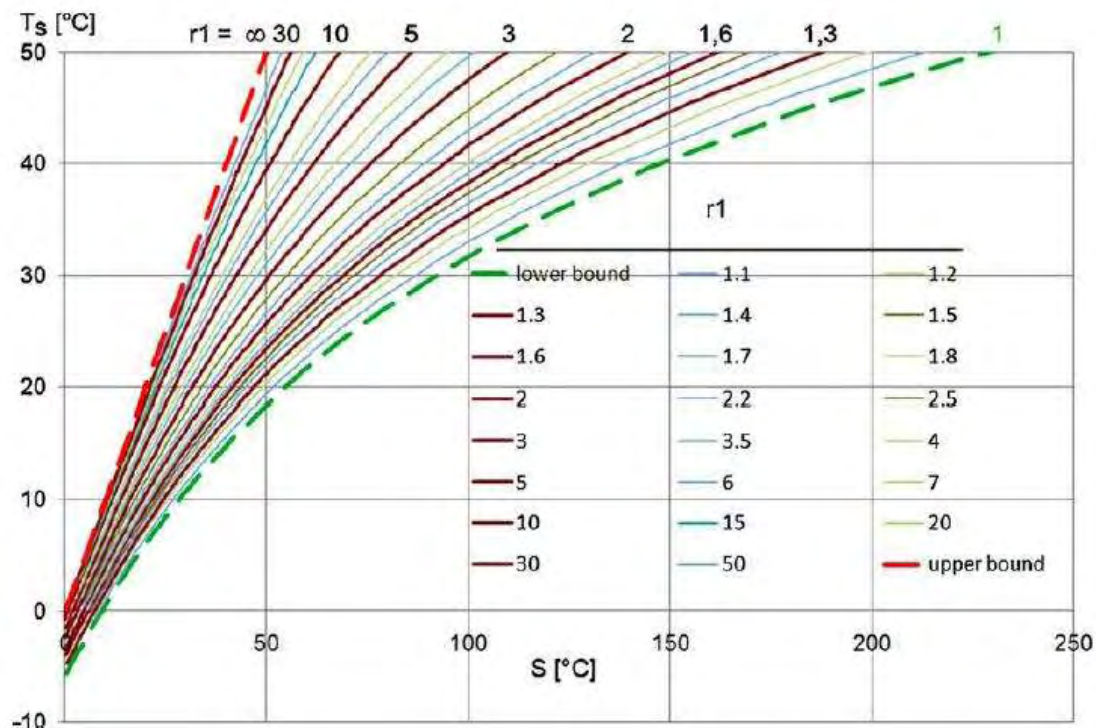
$$T_{\max} = T_i + \frac{R_{n,\text{int}}}{g_a \rho C_p}$$

όπου:

T_i	η θερμοκρασία αέρα (°C)
$R_{n,\text{int}}$	η καθαρή απορροφούμενη ακτινοβολία από το φυτό = R_n πάνω από το φυτό - R_n κάτω από το φυτό ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
ρ	η πυκνότητα του αέρα ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
C_p	η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
δ	η κλίση της καμπύλης κορεσμού υδρατμών στη θερμοκρασία T_i (kPa K^{-1})
g_a	χονδρική αεροδυναμική αγωγιμότητα ⁹ (mm s^{-1})
g_M	μέγιστη αγωγιμότητα φυτοκάλυψης
γ	ψυχομετρική σταθερά (kPa K^{-1})
VPD	έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών (kPa)

Στην προσπάθεια να συμβάλει στην πρακτική αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ο Widmoser (2010) δημοσίευσε διαγράμματα από τα οποία μπορεί να εκτιμηθούν άμεσα οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας της φυτοκάλυψης με βάση τη θερμοκρασία φύλλου, την σχετική υγρασία αέρα, την καθαρή ακτινοβολία πάνω και κάτω από το επίπεδο της φυτοκάλυψης και τους συντελεστές επιφανειακής και αεροδυναμικής αντίστασης (Εικόνα 7).

⁹ Εντός του θερμοκηπίου χρησιμοποιείται η αγωγιμότητα και εκτός η αντίσταση στη μεταφορά υδρατμών. Παρόλο που είναι αντίστροφα το καθένα έχει καλύτερη προσαρμογή στο εντός - εκτός.



Εικόνα 7 Διάγραμμα εντοπισμού ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας φυτοκάλυψης (Widmoser, 2010)

Η δυνατότητα χρήσης του CWSI για τη διαχείριση της άρδευσης έφθασε και σε επίπεδα πρακτικά εφαρμόσιμων προτάσεων. Οι Prenger κ.α. (2005) παρουσίασαν ένα σύστημα ελέγχου της άρδευσης με ανατροφοδότηση σε θερμοκήπιο το οποίο βασίζεται σε μετρήσεις υπέρυθρης θερμομετρίας αλλά δεν μπορεί να ξεφύγει από την ανάγκη μέτρησης και της εξατμισοδιαπνοής για τον υπολογισμό της ποσότητας νερού που πρέπει να χορηγηθεί. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο Jones (1999) κατέληξε ότι σε υγρά κλίματα (ή περιβάλλοντα) οι τιμές του δείκτη αλλάζουν γρήγορα επηρεαζόμενες από ποικίλες περιβαλλοντικές παραμέτρους ενώ ο Κατσούλας (2002) που μελέτησε το δείκτη σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες συμπέρανε ότι οι υψηλές τιμές που παίρνει ο δείκτης νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα οφείλονται κυρίως στα χαμηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας και δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό του επιπέδου της υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.

Το 1994 δημοσιεύτηκε από τους Stanghellini και De Lorenzi μία αξιολόγηση που αποδεικνύει ότι ο εντοπισμός υδατικής καταπόνησης με βάση δείκτες που βασίζονται στη θερμοκρασία κόμης είναι περισσότερο ακριβής από τη μέτρηση ελλείμματος υγρασίας υποστρώματος. Στη λογική αυτή αναπτύχθηκαν μία σειρά από δείκτες όπως οι SI - Stress index (Vidal κ.α., 1994), WDI - Water Deficit Index (Moran κ.α. 1994). Παρόλα αυτά έχει αποδειχθεί ότι η θερμική κατάσταση του φυτού δεν είναι το

απόλυτο άμεσο μέτρο του περιεχομένου σε νερό μια και πολλά είδη δείχνουν σημάδια μειωμένης εξατμισοδιαπνοής χωρίς να έχουν μείωση του περιεχόμενου σε αυτά νερού (Ceccato κ.α. 2001).

Το ολικό υδατικό δυναμικό των φύλλων (Ψ_{leaf}) είναι γνωστό ότι αποτελεί έναν άμεσο δείκτη της υδατικής κατάστασης του φυτού. Το Ψ_{leaf} μετράται με δύο κύριους τρόπους (Taiz και Zeiger, 2006): τον θάλαμο πίεσης και το ψυχρόμετρο. Ο θάλαμος πίεσης (pressure bomb ή pressure chamber) είναι μία συσκευή εύκολη στη λειτουργία που δίνει τη στιγμιαία τιμή του Ψ_{leaf} σε ένα κομμένο φύλλο. Φύλλα ή και ολόκληροι βλαστοί κλείνονται σε θάλαμο όπου αυξάνεται βαθμιαία η πίεση έως ότου από την τομή αρχίσει να εμφανίζεται χυμός, τη στιγμή εκείνη η πίεση είναι ίση με Ψ_{leaf} . Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν τα ακόλουθα: όχι συνεχείς μετρήσεις, σημειακές μετρήσεις, καταστροφική μέτρηση, δύσκολη η σύγκριση και τέλος οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται νωρίς το πρωί πριν το Ψ_{leaf} επηρεαστεί από την εξατμιστική ζήτηση της ατμόσφαιρας. Το ψυχρόμετρο με θερμοζεύγη μπορεί να δώσει συνεχείς μετρήσεις για την εκτίμηση του Ψ_{leaf} χωρίς να απαιτεί απόσπαση του φύλλου από τη θέση του. Η λειτουργία του στηρίζεται στην εκτίμηση του υδατικού δυναμικού Ψ_w με βάση τη θερμοδυναμική σχέση:

$$\Psi_{leaf} = \frac{RT_{abs}}{\bar{V}} \ln \frac{e_a}{P_o}$$

Εξίσωση 9 Θερμοδυναμική σχέση υπολογισμού υδατικού δυναμικού φύλλων

όπου:

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,3144 J MT⁻¹)

V μερικός μοριακός όγκος νερού = 17,984 cm³ M⁻¹ στους 20°C

e_a η πίεση υδρατμών στη δεδομένη θερμοκρασία (kPa)

P_o η πίεση των κορεσμένων ατμών στην ατμοσφαιρική πίεση (kPa)

T_{abs} η απόλυτη θερμοκρασία σε °K

Επειδή RH=100(e_a/e_o), για τον υπολογισμό του Ψ_w απαιτείται η μέτρηση της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας των φύλλων. Η συσκευή μετρά αυτά και από ειδικούς βαθμονομημένες καμπύλες βρίσκεται το Ψ_{leaf} .

Ο Katerji (1988) μελέτησε διάφορους δείκτες υδατικής κατάστασης σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας στην Πορτογαλία και κατέληξε στο ότι το υδατικό δυναμικό (water potential) και η στοματική αγωγιμότητα (stomatal conductance) των φύλλων είναι τα πιο ευαίσθητα κριτήρια όσο αφορά τον εντοπισμό της υδατικής καταπόνησης. Ακόμη ενδιαφέροντα -υπό όρους- για τον ίδιο σκοπό βρήκε ότι είναι

κάποια μικροκλιματικά χαρακτηριστικά όπως η θερμοκρασία και η ροή αερίων από την επιφάνεια της καλλιέργειας. Οι Salleo και Nardini (2003) ανέπτυξαν τον δείκτη WSIV (Water Stress Impact on Vegetation), ο οποίος βασίζεται στο ολοκλήρωμα των ημερήσιων διακυμάνσεων του υδατικού δυναμικού των φύλλων. Μετά από ενδελεχή μελέτη των διαφορετικών εναλλακτικών, ο Jones (2004β) κατέληξε ότι η στοματική αγωγιμότητα είναι καλύτερος δείκτης των αντιδράσεων του φυτού σε συνθήκες μείωσης της διαθέσιμης υγρασίας υποστρώματος σε σχέση με το υδατικό δυναμικό. Η μέτρηση του υδατικού δυναμικού όπως αναφέρθηκε γίνεται με θάλαμο πίεσης ο οποίος όμως είναι απαιτητικός όσο αφορά τη χρήση και δεν μπορεί να συνδεθεί εύκολα σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα το οποίο θα δίνει πρακτικά συνεχείς τιμές. Παρόμοιοι ανασταλτικοί παράγοντες ισχύουν και για το πορόμετρο (porometer) που μετρά την στοματική αγωγιμότητα.

Με τη λογική ότι η διαχείριση της άρδευσης είναι μια πολυσύνθετη διαδικασία έχουν αναπτυχθεί έμπειρα συστήματα (ES - expert systems) με σκοπό την ενσωμάτωση της εμπειρίας των ειδικών για το χειρισμό του συστήματος κάτω από διάφορες καταστάσεις (Mohan, 1996). Οι Lee και Shin (1998) προσπάθησαν να αναπτύξουν ένα σύστημα ελέγχου άρδευσης για τομάτα θερμοκηπίου βασισμένο σε «βιοπληροφορίες». Μέτρησαν μικρομεταβολές στη διάμετρο μίσχων των φύλλων με μετρητές διαμέτρου βλαστού (stem diameter sensor - strain gauges) και κατέληξαν ότι αυτές αντανakλούν την υδατική κατάσταση του φυτού και μπορούν να αποτελέσουν κριτήριο για την έναρξη της άρδευσης (για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας νερού χρησιμοποιούν υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής). Στην ίδια κατεύθυνση έχουν γίνει μελέτες σχετικά με τη χρήση πολύπλοκων συστημάτων (συνδυασμός αισθητήρων) που εκφράζουν αυτό που αναφέρεται ως phytomonitoring όπου για τον έλεγχο της άρδευσης μετρώνται σε πραγματικό χρόνο μία σειρά από μεταβλητές (διάμετρος κορμού, βλαστών και καρπού, θερμοκρασία φύλλου, ταχύτητα ροής χυμών, υγρασία υποστρώματος και μικροκλιματικά δεδομένα (Gurovich και Gratacos, 2002). Παρόμοια εργασία έχει γίνει για σπωρώνες από τους Ton κ.α. 2001. Η Exarchou (2006) με σκοπό την εύρεση της ακριβούς ποσότητας νερού που απαιτεί η καλλιέργεια, μέτρησε την ανταλλαγή αερίων (ένταση διαπνοής και φωτοσύνθεσης) σε τομάτα και αγγούρι από μεμονωμένα φύλλα του φυτού. Κατέληξε ότι στον αλγόριθμο διαχείρισης της άρδευσης είναι απαραίτητο να ενταχθούν και μοντέλα ανάπτυξης της καλλιέργειας (plant growth and development models) ώστε αυτός να είναι αποτελεσματικός.

Η ανάγκη για ανάπτυξη μίας μεθόδου που θα χρησιμοποιεί ως είσοδο ενδείξεις που θα μπορούν να ενταχθούν σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα και θα αποδίδουν άμεσα την εικόνα της υδατικής κατάστασης ικανοποιητικού δείγματος της

καλλιέργειας παραμένει στις ημέρες μας ενεργή. Η χρήση φασματικών μεθόδων μελετάται εδώ και αρκετά χρόνια (Sellers, 1985; Peniūelas κ.α. 1994; Ceccato κ.α. 2001) και η περίπτωση να αποκαλυφθεί η φασματική υπογραφή της υδατικής καταπόνησης έχει μεγάλη πιθανότητα να συμβεί. Οι περισσότερες από τις μετρήσεις καθώς και οι σχετικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της άρδευσης αναφέρονται στα άρθρα ανασκόπησης των Jones (2004), Prenger κ.α. (2005) και Jones και Schofield (2008) και συνοψίζονται στην συνέχεια (Πίνακας 1). Παρόλο που έχει γίνει μεγάλη πρόοδος όσο αφορά την βελτιστοποίηση της άρδευσης στο θερμοκήπιο με βάση κλιματικές και άλλες παραμέτρους του περιβάλλοντος των φυτών (Marcelis κ.α., 2006), μόνο λίγες μέθοδοι χρησιμοποιούν άμεσους φυτικούς φυσιολογικούς δείκτες.

Πίνακας 1 Οι διάφορες προσεγγίσεις μέτρησης της υδατικής κατάστασης των φυτών και οι αντίστοιχοι δείκτες.

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
Μέτρηση εδαφικής υγρασίας (Soil water measurement)			
Υδατικό δυναμικό εδάφους (soil water potential)	Εύκολο να μετρηθεί στην πράξη, αρκετά ακριβές, δίνει ένδειξη και για το πόσο νερό πρέπει να δοθεί, πολλά εμπορικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί, υπάρχει δυνατότητα αυτοματοποίησης.	Η ανομοιομορφία του εδάφους απαιτεί τη χρήση πολλών αισθητήρων ώστε να υπάρχει αντιπροσωπευτική ή εικόνα της κατάστασης. Οι αισθητήρες δεν μετρούν συνήθως την υδατική κατάσταση στο επίπεδο των ριζών (η οποία εξαρτάται από τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής).	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Τενσιόμετρο (tensiometer) Ψυχρόμετρο (psychrometer)
Εδαφική υγρασία (Soil water content)			Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Gravimetric, capacitance/TDR Neutron probe Thermal and electrical conductivity measuring devices
Υδατικά ισοζύγια υποστρώματος (soil water balance calculations)			
	Εύκολα να εφαρμοστούν.	Όχι τόσο ακριβή όσο η άμεση μέτρηση, απαιτούν ακριβείς εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής. Τα σφάλματα είναι αθροιστικά επομένως απαιτείται συχνή ρύθμιση.	

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
Μέτρηση απορροής			Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Παροχόμετρο ή ζυγός Δείκτες: <u>Leaching factor</u>
Καταγραφή καταπόνησης φυτών (plant 'stress' sensing)			
	Η αντίδραση των φυτών μετράται άμεσα, λαμβάνουν υπόψη τους τις επιδράσεις του περιβάλλοντος	Γενικά δεν δίνουν πληροφορία σχετικά με το πόσο νερό πρέπει να χορηγηθεί, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών ελέγχου (thresholds), εφαρμόζονται ακόμη κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο.	
Υδατική κατάσταση ιστών (tissue water status)	Η υδατική κατάσταση των φύλλων θεωρείται από πολλούς ως το πλέον κατάλληλο μέτρο πολλών φυσιολογικών διαδικασιών.	Όλα τα μεγέθη που μετρούνται υπόκεινται σε ομοιοστατική ρύθμιση και επομένως δεν είναι πολύ ευαίσθητα σε αλλαγές της υδατικής κατάστασης (ισουδρικά φυτά). Τα μεγέθη που μετρούνται είναι κατά κανόνα ευαίσθητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες.	
Ορατή μάρανση (visible wilting)	Εύκολη στον εντοπισμό.	Δεν είναι ακριβής. Συνήθως έχει επέλθει ήδη μείωση της παραγωγής πριν εμφανιστούν τα ορατά συμπτώματα. Δύσκολη η αυτοματοποίηση.	
Υδατικό δυναμικό φυτού (water potential)	Ευρέως αποδεκτή τεχνική αναφοράς. Χρήσιμη κυρίως για εκτίμηση του υδατικού δυναμικού των μίσχων (stem)	Αργή και ιδιαίτερα απαιτητική σε εργασία. Δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί.	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Pressure chamber Δείκτες: <ul style="list-style-type: none"> PMS (Plant Moisture Stress) LWP (LEAF WATER POTENTIAL) SWP (STEM WATER

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
	water potential - SWP).		POTENTIAL)
Ψυχρόμετρο (psychrometer)	Ακριβές θερμοδυναμικό μέτρο της υδατικής κατάστασης. Μπορεί να αυτοματοποιηθεί.	Απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και ιδιαίτερες ικανότητες για να χρησιμοποιηθεί.	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Psychrometer
Περιεχόμενο ιστών σε νερό (tissue water content)	Οι αλλαγές στο υδατικό περιεχόμενο των ιστών είναι ευκολότερο να μετρηθούν και να αυτοματοποιηθούν σε σχέση με τις μετρήσεις του υδατικού δυναμικού. Το περιεχόμενο σχετίζεται συνήθως πιο άμεσα με την φυσιολογική λειτουργία παρά με το συνολικό υδατικό δυναμικό.	Εξοπλισμός γενικά πολύπλοκος ή ακριβός. Η μέτρηση του πάχους των φύλλων επηρεάζεται από την πλευρική συρρίκνωση.	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Leaf thickness [γ - or β-ray thickness sensors] Fruit or stem diameter (stem diameter sensor strain gauges) Δείκτες: <u>RWC (Relative Water Content)</u> Είναι μέτρο της υδατικής κατάστασης του φυτού υπό την έννοια της φυσιολογικής συνέπειας του υδατικού ελλείμματος των ιστών. Ουσιαστικά είναι ο λόγος του υδατικού περιεχομένου ενός φυλλικού δείγματος ως προς το μέγιστο δυνατό υδατικό περιεχόμενο που ο ιστός μπορεί να έχει όταν είναι σε σπαργή. Οι τιμές του κινούνται από 98% στην σπαργή έως 40% σε σχεδόν ξεραμένα φύλλα. Στα περισσότερα φυτικά είδη η τυπική τιμή του RWC που υποδηλώνει μαρανση είναι μεταξύ 60-70%. Ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση: $RWC = ((\text{field wt} - \text{oven dry wt}) / (\text{turgid wt} - \text{oven dry wt})) * 100$ (Turner, 1981).
Μέτρηση πίεσης (pressure probe)	Μετρά τη συνιστώσα της πίεσης του υδατικού δυναμικού που αποτελεί την κινητήριο δύναμη για τη ροή μέσω του ξυλεγχύματος.	Είναι κατάλληλη μόνο για πειραματικά ή εργαστηριακά συστήματα.	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Pressure chamber Δείκτες: <u>WSIV (Water stress impact on vegetation)</u> Salleo και Nardini (2003)
Σπηλαιώση ξυλεγχύματος (xylem cavitation)	Παρουσιάζει ευαισθησία σε αυξανόμενη υδατική καταπόνηση.	Η συχνότητα της εξαρτάται από την προϋστορία της καταπόνησης. Η καμπύλη σπηλαιώσης-υδατικής κατάστασης	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> Acoustic sensor

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
		παρουσιάζει υστέρηση –με τις περισσότερες σπηλαιώσεις να συμβαίνουν κατά την ξήρανση- επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη επιτυχημένης ενυδάτωσης.	
Φυσιολογικές αποκρίσεις (physiological responses)	Περισσότερο ευαίσθητες από τις μετρήσεις υδατικής κατάστασης ιστών (κυρίως φύλων)	Εξοπλισμός γενικά πολύπλοκος ή ακριβός. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών ελέγχου (control thresholds).	
Στοματική αγωγιμότητα (stomatal conductance)	Πολύ ακριβές, όργανο αναφοράς για τις ερευνητικές εργασίες	Απαιτεί πολύ εργασία, επομένως δεν είναι κατάλληλο για εμπορικές εφαρμογές. Δύσκολη η αυτοματοποίηση (βρίσκονται σε εξέλιξη κάποιες προσπάθειες). Η μεταβλητότητα από φύλλο σε φύλλο απαιτεί πολλές μετρήσεις ώστε να υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα.	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Porometer Δείκτες: Στοματική αγωγιμότητα
Θερμική καταγραφή (thermal sensing)	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εξ αποστάσεως. Σε συνδυασμό με ανάλυση εικόνας (imaging) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλη έκταση καλλιέργειας. Υπάρχουν και φθηνά θερμόμετρα.	<p>Η θερμοκρασία της κόμης επηρεάζεται από περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και από το άνοιγμα των στοματίων, επομένως απαιτεί ρύθμιση (με τη χρήση υγρής και ξηρής επιφάνειας αναφοράς)</p> <p>Η μεταβλητότητα από φύλλο σε</p>	Όργανα μέτρησης: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Infrared thermometer ▪ Thermal infrared imaging sensors ▪ Thermal camera Δείκτες: <u>SDD (Stress Degree Day)</u> Υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $SDD_i = (T_c - T_a)$, όπου T_c και T_a είναι οι τιμές το μεσημέρι της ημέρας i των θερμοκρασιών της κόμης και του αέρα σε °C αντίστοιχα. Έχει το πλεονέκτημα ότι απαιτεί πολύ απλές μετρήσεις.

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
		φύλλο απαιτεί πολλές μετρήσεις ώστε να υπάρχουν αξιόπιστα δεδομένα.	<p>TSD (Temperature Stress Day) Υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $TSD = (T_c - T_{cw})_i$, δηλαδή με τη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της κόμης της υπό μελέτη καλλιέργειας (T_c) και της αντίστοιχης θερμοκρασίας (T_{cw}) ενός καλά αρδευόμενου φυτού σε °C. Για τον υπολογισμό του απαιτείται να υπάρχει το διάγραμμα θερμοκρασιών της αντίστοιχης καλά αρδευόμενης καλλιέργειας (στη μέγιστη ET).</p> <p>CWSI (Crop Water Stress Index) Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό του δείκτη. Η αναλυτική προσέγγιση (Jackson κ.α., 1981) σύμφωνα με την οποία ο δείκτης ισούται με:</p> $CWSI = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m} \text{ όπου:}$ <p>T_c η θερμοκρασία της κόμης της καλλιέργειας σε °C, υπολογίζεται με τα κατάλληλα αισθητήρια (π.χ. θερμοζεύγη), T_m η ελάχιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να φτάσει η κόμη της καλλιέργειας σε °C και T_M η μέγιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να φτάσει η κόμη της καλλιέργειας σε °C Η εμπειρική προσέγγιση που περιγράφεται από τους Idso κ.α. (1981) και η απλοποιημένη σχέση των Katerji κ.α. (1988) σύμφωνα με την οποία: $CWSI = 1 - \frac{ET}{PET}$ όπου ET είναι η πραγματική και PET η δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Ακόμη εναλλακτικές μορφές του δείκτη έχουν δοθεί από τον Jones (1999):</p> $I2 = \frac{T_{\lambda} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$ $I3 = \frac{T_{\lambda} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{\lambda}}$ $I4 = \frac{T_{dry} - T_{\lambda}}{T_{\lambda} - T_{wet}}$ <p>Όπου T_{λ} η θερμοκρασία του φύλλου, T_{dry} η θερμοκρασία μη διαπνεόντος φύλλου και T_{wet} η θερμοκρασία υγρού φύλλου. Από αυτούς ο I4 έχει ευθεία αναλογία με την στοματική αγωγιμότητα.</p> <p>Όταν ο δείκτης παίρνει τιμές κοντά στο 0 τα φυτά είναι επαρκώς αρδευόμενα, ενώ τιμές</p>

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
			<p>κοντά στο 1 υποδηλώνουν φυτά σε υδατικό στρες. Για τον υπολογισμό του δείκτη εκτός από τον την αρχικά προτεινόμενη διαδικασία έχουν προταθεί διάφορες απλουστευμένες προσεγγίσεις (Kacira, 2005).</p> <p><u>Water Deficit Index (WDI)</u> Ένα είδος CWSI που υπολογίζεται γραφικά (τραπέζιο WDI), λαμβάνοντας υπόψη και το ποσοστό κάλυψης του εδάφους από την καλλιέργεια (Moran κ.α., 1994)</p>
Πολυφασματική καταγραφή (multispectral sensing)			<p>Όργανα μέτρησης¹⁰:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ MultiSpectral sensors ▪ HyperSpectral remote sensing imagers ▪ Digital camera <p>Δείκτες¹¹: <u>Δείκτες RGB</u> Φασματικοί λόγοι με βάση φωτογραφίες RGB (Murase et. al., 1995; Zakaluk and Sri Ranjan, 2007; Zakaluk and Sri Ranjan, 2008)</p> <p><u>RVI (Ratio Vegetation Index) ή SR (Simple Ratio)</u> Υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $RVI \text{ ή } SR = NIR / RED \text{ ή } VIS$ όπου NIR, RED και VIS είναι η ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο, στο κόκκινο και στο ορατό τμήμα του φάσματος (Sellers, 1985)</p> <p><u>WBI (Water Band Index)</u> Υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $WBI = R970/R902$, τα 970 επιλέχθηκαν επειδή βρίσκονταν στην περιοχή απορρόφησης από το νερό, ενώ τα 900 ως τιμή</p>

¹⁰ Η διαφορά μεταξύ MultiSpectral και HyperSpectral βρίσκεται στο ότι ενώ τα όργανα που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία μετρούν σε ορισμένες διακριτές και στενές περιοχές μηκών κύματος (συνήθως έως 8), τα όργανα που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία καταγράφουν πολλές στενές περιοχές του φάσματος (πολλές φορές πάνω από 200).

¹¹ Στην βιβλιογραφία αναφέρονται δεκάδες φασματικοί δείκτες. Στον πίνακα περιλαμβάνονται μόνο όσοι έχουν αξιολογηθεί σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης τους ως δείκτες υδατικής κατάστασης.

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες αναφοράς (Penuelas κ.α., 1993)
			<p><u>RRI – (Relative Reflectance Index)</u> Ο λόγος δεικτών ανάκλασης στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) και στην φωτοσυνθετικά ενεργή περιοχή του φάσματος (PR) μίας καλλιέργειας (RIa) προς την ανάκλαση της ίδιας καλλιέργειας σε συνθήκες αναφοράς (RIr) (Mogensen et al., 1997)</p> <p><u>d_{NIRmin} και λd_{NIRmin}</u> Υπολογίζονται ως το ελάχιστο της πρώτης παραγώγου στην περιοχή NIR και το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε αυτό το ελάχιστο αντίστοιχα (Penuelas κ.α., 1993)</p> <p><u>NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)</u> Υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$ η επιλογή των R_{NIR} και R_{RED} διαφέρει από μελετητή σε μελετητή¹² (Σύμφωνα με την αρχική έκδοση του δείκτη (Rouse κ.α. 1973) $R_{NIR}=790nm$ και $R_{RED}=670nm$)</p> <p>Για τις περιπτώσεις που η καλλιέργεια δεν καλύπτει πλήρως το έδαφος έχει προταθεί η μορφή (Huete, 1988): $SAVI (soil-adjusted vegetation index) = (R_{NIR} - R_{RED} / (R_{NIR} - R_{RED} + L)) (1+L)$ Όπου L ο δείκτης διόρθωσης εδάφους, ο οποίος συνήθως παίρνει τιμές γύρω στο 0,5</p> <p>Ειδικές μορφές του NDVI μπορεί να θεωρηθούν οι:</p> <p>PRI (Physiological Reflectance Index) = $(R_{550} - R_{530}) / (R_{550} +$</p>

¹² Τυπικές περιοχές φάσματος που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις είναι η 0,58 – 0,68 microns για το ορατό και η 0.725 - 1.0 microns για το κοντινό υπέρυθρο. Ο NDVI μιας περιοχής που καλύπτεται από βλάστηση τυπικά παίρνει τιμές από 0,1 έως 1, με τις μεγαλύτερες τιμές να συνδέονται με υψηλότερες πυκνότητες και εντονότερο πράσινο χρωματισμό της βλάστησης (Rouse κ.α., 1973; NOAA, 2009)

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
			<p>R_{530} (Gamon κ.α., 1992; Penñelas κ.α., 1994)</p> <p>NPCI (Normalized Pigment Chlorophyll ratio Index) = $(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$ (Penñelas κ.α., 1994)</p> <p>NDNG (Normalized difference based on NIR and green reflectance) = $(R_{790} - R_{550}) / (R_{790} + R_{550})$ (El-Shikha κ.α., 2007)</p> <p><u>%OS (percent overshoot)</u> Ποσοστό μέγιστης εκπομπής ακτινοβολίας από τα φυτά (fluorescent) μετά από αλλαγή στο φωτισμό σε σχέση με την εκπομπή σε σταθερή κατάσταση (steady-state)</p> <p><u>Rfd (ratio of fluorescence decrease)</u> Λόγος μείωσης της εκπομπής ακτινοβολίας από τα φυτά (fluorescent) μετά από αλλαγή στο φωτισμό σε σχέση με την εκπομπή σε σταθερή κατάσταση (steady-state)</p> <p>Οι δύο αυτοί δείκτες έχουν το μειονέκτημα ότι δεν φαίνεται να έχουν χρησιμότητα παρά μόνο σε ειδικές συνθήκες εργαστηρίου.</p> <p><u>SAVI (Soil adjusted vegetation index)</u> Προτάθηκε από τον Huete (1988) και ορίζεται ως: $SAVI = [(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680} + L)] (1+L)$ όπου L ο παράγοντας ρύθμισης για τη μείωση του θορύβου σήματος που προκαλείται από το έδαφος (L=0,5 αν δεν υπάρχει άλλη πληροφορία).</p> <p><u>T_{ij} και CI (colour index)</u> Στατιστικός εντοπισμός διαφοράς στο χρώμα μεταξύ καλλιεργειών (π.χ. υπό καταπόνηση και κανονική) (Bacci κ.α., 1998)</p> <p><u>T_p (Time to peak)</u> Χρονική διάρκεια από τη στιγμή αλλαγής στο φωτισμό σε σχέση με την σταθερή κατάσταση</p>

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
			<p>(steady-state) έως την εμφάνιση της μέγιστης εκπομπής ακτινοβολίας από τα φυτά (fluorescent). Μετριέται με επιτυχία με τη relative referencing method (RRM) με χρήση ακτινοβολίας UV (Norikane και Kurata, 2001).</p> <p><u>MSI (Moisture Stress Index)</u> ονομάζεται και SI (Simple Ratio) Υπολογίζεται με βάση τη σχέση: $MSI = R_{1600}/R_{820}$ (Hunt και Roch, 1989; Ceccato κ.α. 2001)</p> <p><u>TPCA (Top projected canopy area)</u> (Kacira και Ling 2001) από ανάλυση εικόνων φωτογραφιών κάτοψης (machine vision) αλλά μόνο για φυτά που φαίνονται εύκολα από πάνω (όχι πολύ ψηλά).</p> <p><u>VCI - (Vegetation Condition Index)</u> Μία παραλλαγή του δείκτη NDVI είναι ο VCI ο οποίος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών στη βλάστηση. Ο VCI προτάθηκε από τον Kogan (1990 και 1997) και ορίζεται από τη σχέση: $VCI = 100 * ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))$ Η ελάχιστη και μέγιστη τιμή αφορούν απόλυτα ακραίες τιμές για δεδομένο χρονικό διάστημα.</p>
Μέτρηση ροής χυμών (sap-flow sensors)	Είναι πολύ ευαίσθητοι	Παρέχουν μόνο έμμεσες εκτιμήσεις των αλλαγών της αγωγιμότητας, λόγω του ότι η ροή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Απαιτεί πολύπλοκα όργανα και υψηλή τεχνική κατάρτιση. Απαιτεί ρύθμιση για κάθε ξεχωριστό φυτό	Sap-flow sensor

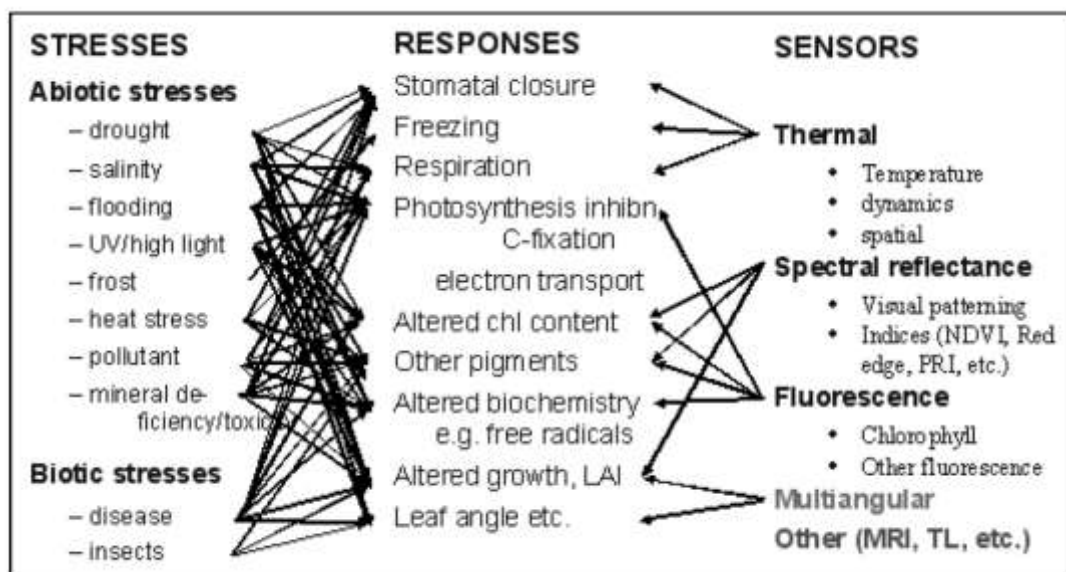
Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Μετρήσεις, απαιτούμενος εξοπλισμός και σχετικοί δείκτες
		και για τον ορισμό των τιμών ελέγχου (control thresholds).	
Ρυθμός ανάπτυξης (growth rate)	Πιθανότατα ο πιο ευαίσθητος δείκτης υδατικής καταπόνησης	Απαιτεί ειδικό εξοπλισμό πολύ ευαίσθητο ο οποίος είναι ακριβός.	

Μετρήσεις παραμέτρων υδατικών δεικτών από απόσταση και ανάπτυξη νέων δεικτών που βασίζονται στην δυνατότητα αυτή

Η καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ανακλάται ή εκπέμπεται από μία εκτεταμένη επιφάνεια μέσω εναέριων αισθητήρων περιγράφεται με τον γενικό όρο τηλεπισκόπηση (remote sensing). Αρκετές εργασίες προσπάθησαν να ποσοτικοποιήσουν την υδατική καταπόνηση με χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης (Bowman, 1989; Penuelas κ.α., 1993; Bausch, 1995).

Το βασικό βήμα στη διαδικασία ανάπτυξης λειτουργικών τεχνικών με σκοπό την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης καλλιεργειών με χρήση “τηλεπισκόπησης” είναι να υπάρχει ξεκάθαρη άποψη σχετικά με το που μπορεί να βασιστεί η δυνατότητα αυτή, ώστε να μελετηθεί η αξία της (Knipling, 1970; Sellers, 1985).

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει σε μία φυλλική επιφάνεια, ένα μέρος του ανακλάται (reflected), ένα άλλο μέρος διαπερνά (transmitted) τα φύλλα και ένα τρίτο μέρος απορροφάται (absorbed) από τα φύλλα. Το μέρος που απορροφάται ακολουθεί ένα από τους ακόλουθους ανταγωνιστικούς δρόμους: (α) χρησιμοποιείται σε φωτοχημικές διεργασίες, (β) απομακρύνεται με τη μορφή θερμότητας ή (γ) επανεκπέμπεται με τη μορφή φωτός (chlorophyll fluorescence) (Löfkvist, 2010).



Εικόνα 8 Καταπονήσεις, αντιδράσεις των φυτών και αισθητήρες τηλεπισκόπησης που μπορούν να καταγράψουν τα σχετικά σήματα (Jones και Schofield, 2008).

Όσο αφορά την υδατική καταπόνηση οι πιο χαρακτηριστικές αντιδράσεις των φυτών σχετίζονται με κλείσιμο στοματίων, μείωση ρυθμού φωτοσύνθεσης, μείωση ανάπτυξης και παραγωγής, μάρανση φύλλων και απώλεια χρωστικών όπως η χλωροφύλλη (Leinonen κ.α., 2006; Jones και Schofield, 2008). Όταν τα στομάτια δεν είναι αρκετά ανοικτά ο ρυθμός φωτοσύνθεσης μειώνεται και μαζί και η παραγωγή μονάδων του φωτοσυνθετικού συστήματος II (PSII) (Chaves κ.α., 2002). Ακόμη, ως αποτέλεσμα την μειωμένης απορρόφησης CO₂, μεγάλο μέρος της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τα φύλλα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ροή ηλεκτρονίων στο πλαίσιο της φωτοσύνθεσης και μετατρέπεται σε θερμότητα (Krause & Weis, 1991; Baker & Rosenqvist, 2004). Ακόμη έχουν αναφερθεί μεταβολές στην εκπομπή ακτινοβολίας- φθορισμό της χλωροφύλλης (fluorescence) λόγω της υδατικής καταπόνησης (Baker & Ort, 1992; Lichtenthaler & Babani, 2000). Έτσι λοιπόν είναι κοινά αποδεκτό ότι αλλαγές στην φυσιολογία του φυτού εξαιτίας υδατικής καταπόνησης συνδέονται με αλλαγές στην ανάκλαση σε διάφορα μήκη κύματος (Pinter κ.α., 2003). Όμως ένα μεγάλο πρόβλημα βρίσκεται ακριβώς στο ότι βασικά δεν καταγράφεται η ίδια η καταπόνηση αλλά η αντίδραση του φυτού σε αυτή. Για παράδειγμα μπορούμε να μελετήσουμε το άνοιγμα των στοματίων από την επίδραση που έχουν στην θερμοκρασία του φύλλου αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να έχουμε κατά νου ότι η αντίδραση αυτή μπορεί να προκύψει από μία σειρά διαφορετικών καταπονήσεων (υδατική καταπόνηση, υψηλή αλατότητα νερού, προσβολή από μύκητες κοκ). Η πολυπλοκότητα της κατάστασης φαίνεται στην

Εικόνα 8 όπου παρουσιάζονται διάφορα είδη καταπόνησεων, οι τυπικές αντιδράσεις των φυτών και οι αισθητήρες τηλεπισκόπισης που μπορούν να καταγράψουν σχετικά σήματα.

Εκπομπή ακτινοβολίας από τα φυτά στην περιοχή του ορατού

Η εκπεμπόμενη από τα φυτά ενέργεια στην περιοχή του ορατού αποδίδεται με τον όρο φθορισμός (plant fluorescence ή chlorophyll fluorescence, F). Η διεργασία αυτή ανήκει στους μηχανισμούς απομάκρυνσης περίσσειας ενέργειας από τα φυτά. Η έντασή της είναι μικρή και πολλές φορές για να μετρηθεί πρέπει μία εξωτερική πηγή ενέργειας π.χ. ένας παλμός laser ή μία ακτίνα UV-A διεγείρει το φυτό ώστε να οδηγηθεί σε εκπομπή ακτινοβολίας. Εάν δεν χρησιμοποιηθεί εξωτερική πηγή στιγμιαίας ενεργοποίησης, η ακτινοβολία αυτού του τύπου που εκπέμπεται υπό σταθερό φωτισμό (όπως συμβαίνει υπό φυσιολογικές συνθήκες σε κάθε καλλιέργεια) είναι γνωστή με το όρο steady-state fluorescence (F_s). Τα μήκη κύματος που σχετίζονται κατά κύριο λόγο με την εκπομπή αυτή από ένα πράσινο φύλλο όταν διεγείρεται από ακτινοβολία UV-A είναι τα 440, 520, 690 και 740 nm μελετήθηκαν σε βάθος από τους Lichtenthaler και Miehe (1997) και τους Buschmann κ.α. (2000). Οι κορυφές στην περιοχή του κόκκινου και του μακρινού-κόκκινου σχετίζονται κυρίως με την εκπομπή της χλωροφύλλης-α και κατ' επέκταση με την φωτοσυνθετική διαδικασία. Η εκπομπή στα μικρότερα μήκη κύματος συνδέεται κυρίως με άλλα συστατικά όπως οι φαινόλες. Μετρήσεις εκπομπής ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος (στην περιοχή του ορατού) φυτών τομάτας (Norikane και Kurata, 2001; Kacira κ.α., 2005), έχουν δείξει μέτρια αποτελέσματα ως προς τη συσχέτιση με τον πρόωρο εντοπισμό της υδατικής καταπόνησης. Όλες οι σχετικές δοκιμές έχουν γίνει σε συνθήκες προσομοίωσης των πραγματικών συνθηκών σε εργαστήρια. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι στην εργασία τους οι Norikane και Kurata (2001), βρήκαν ότι οι λόγοι τιμών εκπομπής σε διάφορα μήκη κύματος (440/530, 440/685, 440/740, 530/685, 530/740 και 685/740) δεν έδειξαν καλή συσχέτιση σε αλλαγές της υδατικής κατάστασης του φυτού. Αντίθετα η Sarlikioti κ.α. (2010α) εντόπισαν συσχετίσεις της εκπομπής αυτής με την υδατική καταπόνηση.

Στην πράξη το μέγεθος της εκπομπής παρουσιάζει δυσκολίες στην αξιοποίηση ως σήμα μια και εξαρτάται σημαντικά από τον φωτισμό και το εύρος των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των φύλλων (Jones και Schofield, 2008).

Εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τα φυτά

Η καταγραφή της θερμικής ακτινοβολίας αποτελεί βασικό εργαλείο της εξ'αποστάσεως μελέτης της υδατικής κατάστασης των φυτών. Η ένταση της θερμικής

ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία καλλιέργεια σχετίζεται με τη θερμοκρασία των φύλλων η οποία με τη σειρά της εξαρτάται άμεσα από το ρυθμό εξατμισοδιαπνοής (συντελεί στο δροσισμό των φύλλων) ο οποίος ελέγχεται από τον άνοιγμα ή κλείσιμο των στοματίων. Το βασικό πρόβλημα με τη χρήση της θερμικής καταγραφής είναι ότι η θερμοκρασία του φύλλου (T_l) εξαρτάται μέσω ενός πολύπλοκου τρόπου με την θερμοκρασία του αέρα (T_a), το έλλειμμα πίεσης κορεσμού (VPD), την ταχύτητα του αέρα (u) και την καθαρή ακτινοβολία (R_n) που απορροφάται. Διάφορες εξισώσεις ενέργειας προτείνονται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας φύλλου, μία χρηστική έκφραση (Εξίσωση 10) παρουσιάζεται από τους Leinonen κ.α. (2006).

Εξίσωση 10

Διαφορά

θερμοκρασίας

φύλλου -

αέρα

$$T_l - T_a = [r_{HR}(r_a + r_s)\gamma R_{ni} - \rho c_p r_{HR}(e_s - e_a)] / [\rho c_p [\gamma(r_a + r_s) + \Delta r_{HR}]]$$

όπου:

- r_s η αντίσταση επιφάνειας του φύλλου (ή αντίσταση φύλλου) στη διάχυση υδρατμών ($s\ m^{-1}$) η οποία έχει ως βασικό παράγοντα την σχετική στοματική αντίσταση
- ρ η μέση πυκνότητα του αέρα ($kg\ m^{-3}$)
- c_p η ειδική θερμότητα αέρα υπό σταθερή πίεση ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
- r_{HR} η αντίσταση στην μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας και ακτινοβολίας ($s\ m^{-1}$)
- Δ η κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών ($Pa\ ^\circ C^{-1}$)
- T_l, T_a οι θερμοκρασίες φύλλου και αέρα αντίστοιχα ($^\circ C$)
- $e_s - e_a$ το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών του αέρα, e_s η πίεση υδρατμών στο κορεσμό (για θερμοκρασία αέρα) (Pa) και e_a η πίεση υδρατμών (για θερμοκρασία αέρα) (Pa),
- γ η ψυχομετρική σταθερά ($Pa\ ^\circ C^{-1}$)
- R_{ni} η ισόθερμη καθαρή ακτινοβολία ($W\ m^{-2}$), δηλαδή η ακτινοβολία που θα απορροφούνταν από ένα φύλλο εάν αυτό είχε τη θερμοκρασία αέρα.
- r_a η αεροδυναμική αντίσταση στη διάχυση υδρατμών ($s\ m^{-1}$)

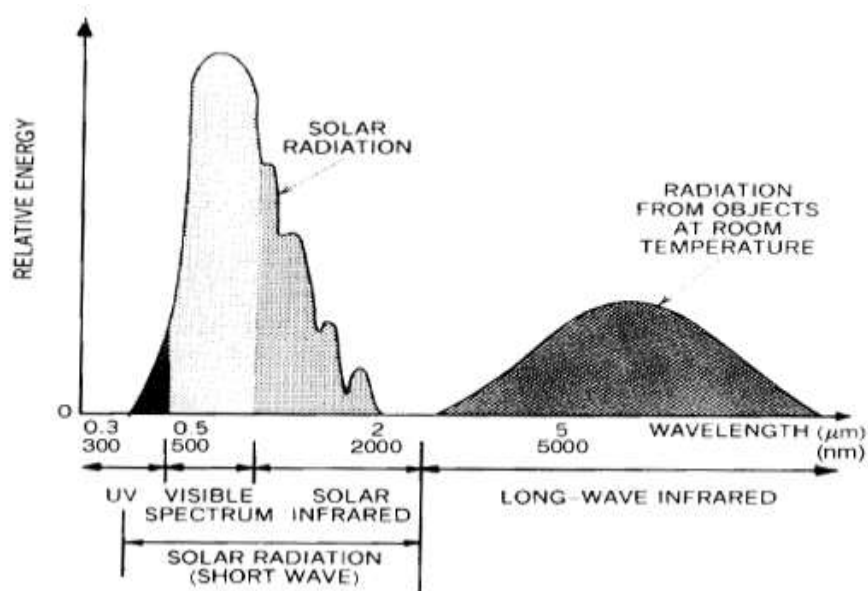
Ο Jones (1999) δοκίμασε την χρήση υπέρυθρης θερμομέτρησης (infrared thermometry) για την εκτίμηση της στοματικής αγωγιμότητας με σκοπό τη διαχείριση

της άρδευσης. Οι ενδείξεις χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό του CWSI. Η θέση του είναι ότι παρόλο που ο δείκτης υδατικής καταπόνησης αποτελεί χρήσιμη ένδειξη για την ανάγκη άρδευσης δεν μπορεί να δώσει πληροφορία σχετικά με το πόσο νερό χρειάζεται ή πότε ακριβώς πρέπει αυτό να δοθεί (timing).

Ανάκλαση ακτινοβολίας από τα φυτά

Η ανάκλαση από μία φυτική επιφάνεια επηρεάζεται από το σύνολο των φυσικών, βιολογικών, υδρολογικών και λοιπών ιδιοτήτων της. Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται μπορούν στην συνέχεια να υποστούν επεξεργασία και να ερμηνευτούν με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων μόνο εάν υφίσταται μία θεμελιώδης κατανόηση της σχέσης μεταξύ φυσικών σωμάτων και ενέργειας όσο αφορά την υπό μελέτη επιφάνεια.

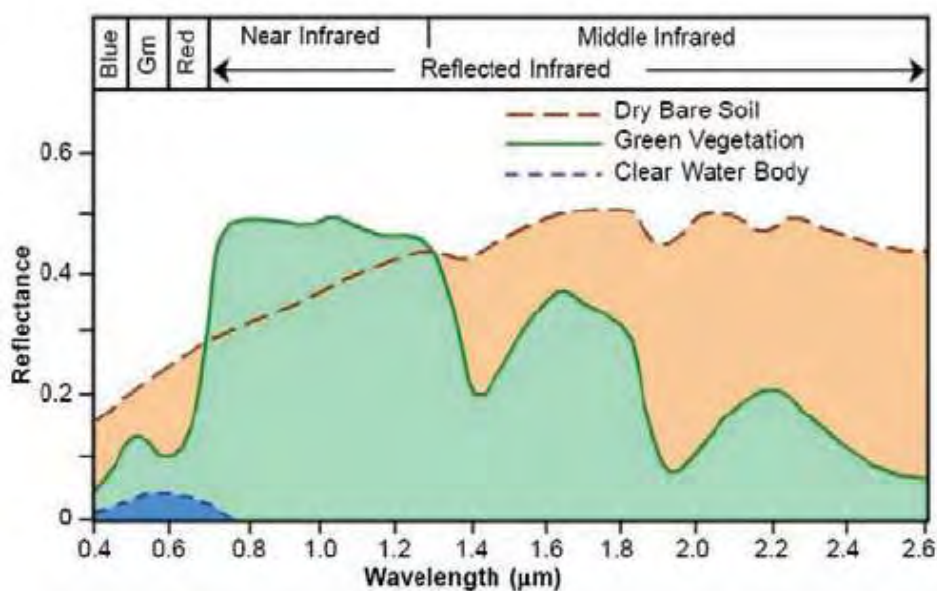
Η γνώση του τρόπου με τον οποίο η ηλιακή ακτινοβολία (Εικόνα 9) αλληλεπιδρά με μία φυλλική επιφάνεια είναι απαραίτητη ώστε να μπορούμε να κατανοήσουμε και να επεξεργαστούμε δεδομένα ανάκλασης από αυτή. Σε μία φυλλική επιφάνεια η ανακλαστικότητα εκτός από τα χαρακτηριστικά των μεμονωμένων φύλλων καθορίζεται από την ανομοιομορφία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, την μορφή των φυτών, το προσανατολισμό και την κλίση της επιφάνειας, τις σκιάσεις και την ανάκλαση από το περιβάλλον-υπόβαθρο (Sellers, 1985).



Εικόνα 9 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας

Οι αισθητήρες μέτρησης της ανάκλασης που τοποθετούνται πάνω από μία φυλλική επιφάνεια λαμβάνουν προφανώς το σύνολο της ακτινοβολίας που ανακλάται και

εκπέμπεται υπό όλες αυτές τις επιδράσεις και κάθε συνδυασμός φυτού – καλλιεργητικής τεχνικής μπορεί να έχει μία χαρακτηριστική υπογραφή που επιτρέπει την αναγνώρισή του (Εικόνα 10). Παρόμοιες υπογραφές έχουν ήδη αναγνωριστεί για κάποιες καταστάσεις καταπόνησης (ασθένειες, τροφοπενίες κοκ).



Εικόνα 10 Φασματικές υπογραφές ανάκλασης από στεγνό γυμνό έδαφος, πράσινη βλάστηση και καθαρό νερό (Smith, 2000β)

Όσο αφορά τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ανακλαστικότητας χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Ceccato κ.α., 2001) ανάλογα με το μήκος κύματος:

- 400-2500nm, ορατό έως υπέρυθρο χαμηλού μήκους κύματος (visible to shortwave infrared), έχει χρησιμοποιηθεί για πληροφορία σχετικά με βιοφυσικές παραμέτρους της βλάστησης όπως περιεχόμενο σε χλωροφύλλη, δείκτης φυλλικής επιφάνειας και περιεκτικότητα σε νερό.
- 6-15μm, θερμικό υπέρυθρο (thermal infrared). Δίνει πληροφορίες σχετικά με τη θερμοδυναμική κατάσταση της καλλιέργειας και έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής.
- 0,1-100cm ραντάρ (radar). Δίνει πληροφορίες σχετικά με τη διηλεκτρική σταθερά η οποία μπορεί να συνδεθεί με το περιεχόμενο σε νερό.

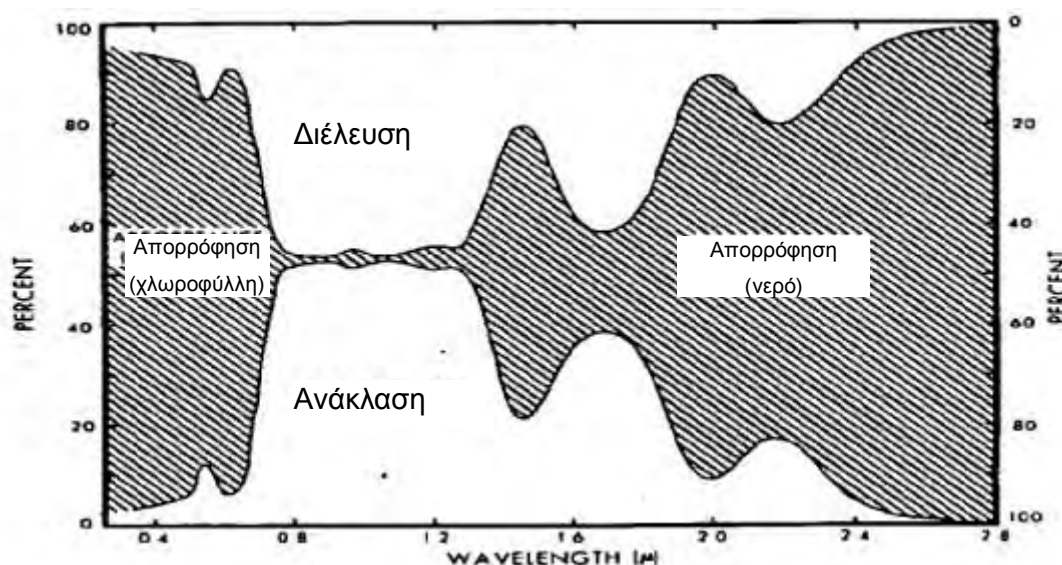
Σε κάθε περίπτωση οι αισθητήρες μετρούν το συνδυασμένο αποτέλεσμα ανάκλασης και εκπομπής ακτινοβολίας από την υπό μελέτη επιφάνεια, απλά η εκπομπή είναι μικρή σε σχέση με ανάκλαση όταν η επιφάνεια φωτίζεται από τον ήλιο.

Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ όλες οι αναφορές αφορούν ποσοστά ανάκλασης, οι τιμές αυτές δεν αντικατοπτρίζουν άμεσα την κατανομή της ενέργειας που πραγματικά ανακλάται από ένα φύλλο μια και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το φάσμα.

Ανάκλαση από μεμονωμένα φύλλα

Από την προσπίπτουσα (incident) στο φύλλο ακτινοβολία ένα μέρος ανακλάται (reflectance) ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται (absorption) είτε αφού υποστεί διάθλαση (refraction), διέρχεται από το φύλλο (transmittance). Οι τρεις αυτές συνιστώσες σχετίζονται άμεσα και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν προσπαθούμε να αξιολογήσουμε τις φυσικές και φυσιολογικές βάσεις της ανάκλασης από το φύλλο.

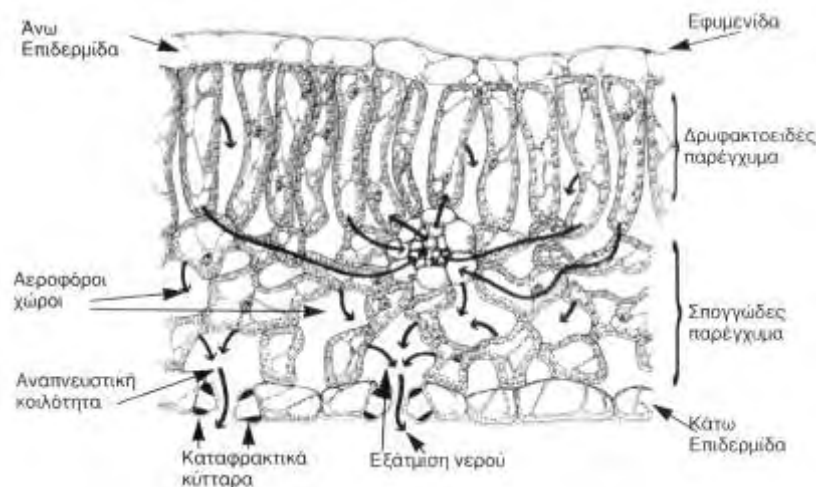
Στην Εικόνα 11 παρουσιάζονται (% της ενέργειας που προσπίπτει στο φύλλο συναρτήσει του μήκους κύματος) τα τυπικά φάσματα ανάκλασης, απορρόφησης και διέλευσης ηλιακής ακτινοβολίας από φύλλο (Knippling, 1970).



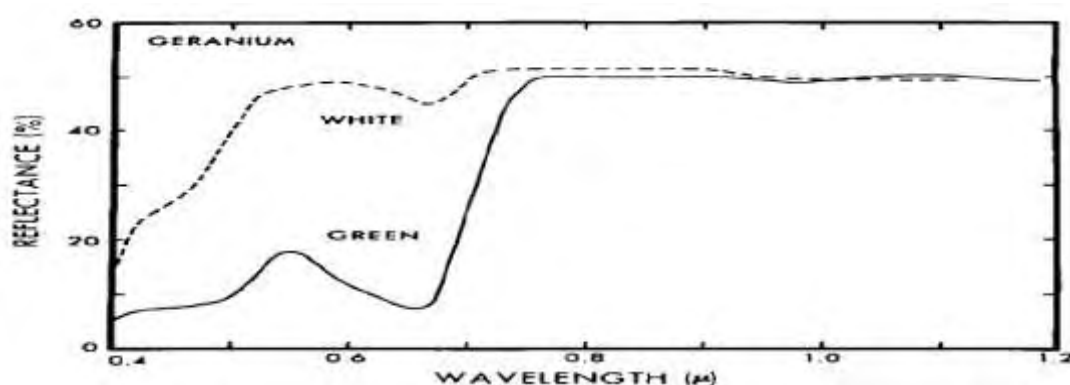
Εικόνα 11 Ανάκλαση, απορρόφηση και διέλευση ηλιακής ακτινοβολίας από φύλλο καπνού (400-2700nm – 0,4-2,7μ) (Knippling, 1970)

Το φάσμα της διέλευσης έχει το ίδιο σχήμα με αυτό της ανάκλασης ενώ η απορρόφηση είναι η διαφορά ανάκλασης και διέλευσης. Ένα μεμονωμένο φύλλο έχει χαμηλή ανάκλαση στην περιοχή του ορατού (400-700nm), λόγω ισχυρής απορρόφησης από τη χλωροφύλλη, σχετικά υψηλή ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο (700-1300nm), λόγω διάχυσης (scattering) στο εσωτερικό του φύλλου (Εικόνα 12) και πρακτικά μηδενική απορρόφηση (absorption) - σχετικά χαμηλή ανάκλαση στο υπέρυθρο (>1300nm) λόγω ισχυρής απορρόφησης από το νερό που βρίσκεται μέσα

στο φύλλο. Στο υπεριώδες και στο μακρύ υπέρυθρο (<400nm και >2700nm αντίστοιχα) η ανάκλαση είναι σχετικά ομοιόμορφη και χαμηλή (περίπου 5%).



Εικόνα 12 Τομή τυπικού φύλλου που δείχνει τους δρόμους που ακολουθούν τα μόρια του νερού κατά τη στοματική διαπνοή (Καράταγλης, 1992)



Εικόνα 13 Ανάκλαση από λευκό και πράσινο τμήμα φύλλου γερανιού (400-1200nm – 0,4-1,2 μ) (Knipling, 1970)

Η εξήγηση της μορφής του τυπικού φάσματος ανάκλασης δίνεται ανά περιοχή μήκους κύματος στην συνέχεια:

- Στην περιοχή του ορατού (400-700nm) η ισχυρή απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας οφείλεται στις χρωστικές του φύλλου (pigments) του φύλλου κυρίως χλωροφύλλες αλλά και καρωτενοειδή, ξανθοφύλλες, ανθοκυανίνες (Knipling, 1970; Sellers, 1985). Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό στο φάσμα ανάκλασης ενός τμήματος φύλλου που δεν έχει χλωροφύλλη (λευκό) σε σχέση με ένα που έχει (Εικόνα 13). Ακόμη τα υψηλά επίπεδα της ανάκλασης στο ορατό από λευκά και αφυδατωμένα φύλλα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας σε αυτά τα

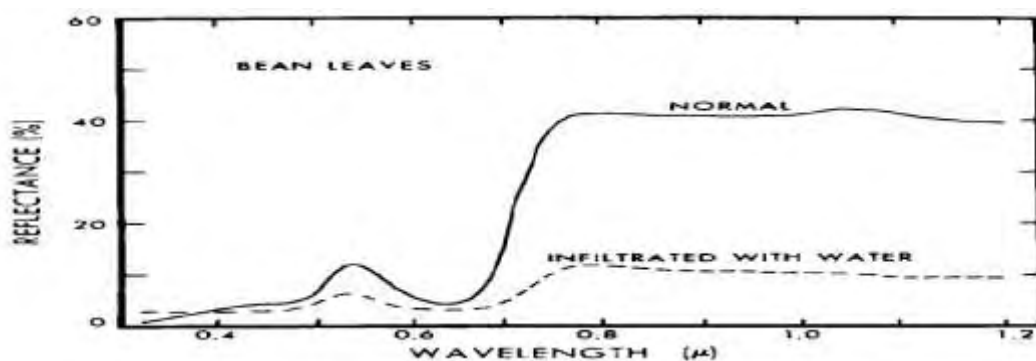
μήκη κύματος με τη δομή του φύλλου δεν διαφέρουν από την αλληλεπίδραση με την ενέργεια στο κοντινό υπέρυθρο (Knipling, 1970).

- Η ισχυρή ανάκλαση από τα φύλλα στο κοντινό υπέρυθρο (700-1300nm) έχει φανεί ότι οφείλεται στην εσωτερική κυτταρική δομή τους. Το κερί στην εφυμενίδα του φύλλου είναι σχεδόν διάφανο στην ορατή και υπέρυθρη ακτινοβολία και ελάχιστη από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φύλλο ανακλάται απευθείας από την εξωτερική του επιφάνεια. Η ακτινοβολία διαχέεται (diffused) και διασπείρεται (scattered) μέσω της επιδερμίδας στα κύτταρα του μεσοφύλλου και αεροφόρους χώρους στο εσωτερικό του. Εκεί η ακτινοβολία υπόκειται σε επιπλέον διάχυση και υπόκειται πολλαπλές ανακλάσεις και διαθλάσεις που οφείλονται στα χαρακτηριστικά της κατασκευής κυττάρων και ιστών και κυρίως των διεπιφανειών¹³ μεταξύ κυταρικών τοιχωμάτων και αέρα, πρωτοπλάσματος και κυτταρικών τοιχωμάτων, χλωροπλαστών και πρωτοπλάσματος και χλωροπλαστών και κυτταρικών τοιχωμάτων (Grant, 1987). Οι διάταξη των διεπιφανειών αυτών στο χώρο αλλάζει κατά την εξέλιξη του υδατικού ελλείματος ως συνέπεια της απώλειες της κυτταρικής πίεσης σπαργής (Penueles κ.α., 1993). Αμελητέα ποσότητα από την υπέρυθρη απορροφάται εσωτερικά και περίπου 40-60% αυτής φεύγει προς τα πάνω μέσω της επιφάνειας πρόσπτωσης (πάνω επιφάνεια του φύλλου) και χαρακτηρίζεται ως ανακλώμενη ακτινοβολία ενώ το υπόλοιπο πηγαίνει προς τα κάτω, περνάει μέσα από φύλλο και χαρακτηρίζεται ως διερχόμενη ακτινοβολία. Αυτός ο εσωτερικός μηχανισμός διασποράς ευθύνεται για την ομοιότητα στο φάσμα ανάκλασης και διέλευσης. Ακόμη έχει αποδειχθεί (Εικόνα 13) ότι η χλωροφύλλη δεν επηρεάζει την ανάκλαση στο υπέρυθρο (Knipling, 1970).
- Τα υψηλά επίπεδα υπέρυθρης (πάνω από 1300nm) ανάκλασης από λευκά και αφυδατωμένα φύλλα (Εικόνα 13 και Εικόνα 14) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας σε αυτά τα μήκη κύματος με τη δομή του φύλλου δεν διαφέρουν από την αλληλεπίδραση με την ενέργεια στο κοντινό υπέρυθρο (Knipling, 1970). Αλλά η παρουσία νερού έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση μεγάλου τμήματος από την ενέργεια της ακτινοβολίας σε αυτή την περιοχή του φάσματος κυρίως στο μέσο υπέρυθρο (MIR: 1,3-3,0μm) (Bauer, 1985; Grant, 1987).

¹³ Υπάρχουν διαφορές μεταξύ των δεικτών διάθλασης μεταξύ αέρα (1,0) και ενυδατωμένων κυταρικών τοιχωμάτων (1,4) (Knipling, 1970).

- Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν ακόμη περιοχές απορρόφησης (λιγότερο ισχυρές) στα 760, 960, 1450, 1940 και 2950 nm λόγω των δεσμών υδρογόνου – οξυγόνου του νερού (Penuelas κ.α., 1993).

Η θεωρία για τον εσωτερικό μηχανισμό ανάκλασης είναι σχετικά ισχυρή. Η δραστική μείωση της ανάκλασης στο κοντινό υπέρυθρο ενός φύλλου που έχει κορεστεί με νερό υποστηρίζει την προσέγγιση αυτή (Εικόνα 14). Το νερό αντικαθιστά τον αέρα στους αεροφόρους χώρους και σχηματίζει μία συνεχή υγρή φάση εντός του φύλλου, έτσι αίρονται οι διαφορές στους δείκτες διάθλασης μεταξύ επιφανειών διεπαφής με αποτέλεσμα να αυξάνεται η άμεση μετάδοση εις βάρος της διάχυσης.



Εικόνα 14 Η επίδραση του κορεσμού των μεσοκυττάρων χώρων με νερό στην φασματική ανάκλαση φύλλων φασολιού (Knipling, 1970)

Το γεγονός ότι οι χλωροφύλλες και το νερό στο φύλλο που δεν έχει κορεστεί με νερό απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας στο ορατό και στο υπέρυθρο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως απόδειξη για τον εσωτερικό μηχανισμό επειδή η ακτινοβολία πρέπει να εισέλθει στο φύλλο ώστε να μπορεί να απορροφηθεί. Μελέτη άλλων θεωρητικών μοντέλων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι άλλη μία σημαντική παράμετρος στον καθορισμό του επιπέδου της ανάκλασης είναι ο αριθμός της συνολικής έκτασης των επιφανειών επαφής αέρα – κυτταρικών τοιχωμάτων και όχι ο όγκος του χώρου αέρα εντός το φύλλο. Έτσι το δρυφακτοειδές παρέγχυμα παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο με το σπογγώδες στην εσωτερική διάχυση της ακτινοβολίας (Knipling, 1970).

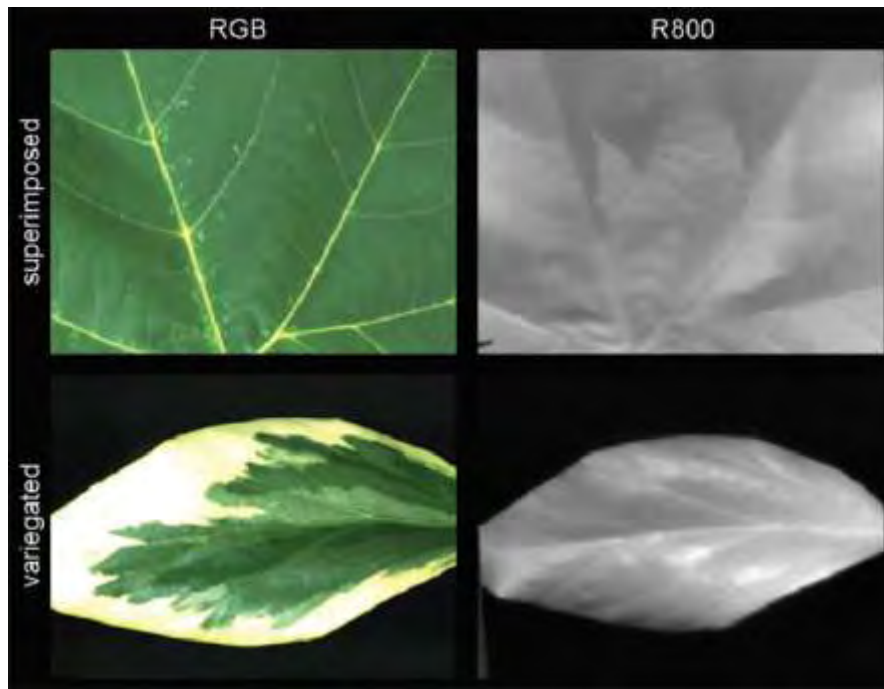
Ανάκλαση από φυλλικές επιφάνειες

Οι ανακλαστικές ιδιότητες των ξεχωριστών φύλλων είναι προφανώς η βάση για την κατανόηση της ανάκλασης από μία πραγματική φυλλική επιφάνεια. Υπάρχουν όμως τόσο ποσοτικές όσο και ποιοτικές διαφορές στα φάσματα που λαμβάνονται από τις δύο αυτές περιπτώσεις. Σε ποσοστιαία βάση η ανάκλαση από μία φυλλική επιφάνεια

είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή ενός φύλλου εξαιτίας τις γενικότερης άμβλυνσης της ακτινοβολίας λόγω διακυμάνσεων στην γωνία φωτισμού, στον προσανατολισμό και την κλίση του φύλλου, στην παρουσία σκιάσεων και την ανάκλαση από μη-φυλλικές επιφάνειες που βρίσκονται στο υπόβαθρο (π.χ. το έδαφος).

Η ανάκλαση στο ορατό και το υπέρυθρο από μία σχεδόν συνεχή και πυκνή φυλλική επιφάνεια μπορεί να είναι στο επίπεδο του 3-5% και 35% αντίστοιχα ενώ οι αντίστοιχες τιμές για ένα φύλλο είναι περίπου 10 και 50%. Η μικρότερη μείωση στην υπέρυθρη περιοχή οφείλεται στον ρυθμιστικό παράγοντα της υπέρυθρης ανάκλασης (compensating factor). Πολλή από την προσπίπτουσα υπέρυθρη ακτινοβολία περνά από τα πάνω φύλλα, ανακλάται από τα παρακάτω στρώματα και περνώντας πάλι από τα πάνω φύλλα ενισχύει την συνολική ανάκλαση της φυλλικής επιφάνειας (Εικόνα 15).

Η σχέση μεταξύ του φάσματός ανάκλασης και του περιεχομένου του φύλλου σε νερό μελετήθηκε για πολλά φυτικά είδη και η έρευνα εντοπίστηκε κατά κύριο λόγο στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (Gausman κ.α., 1971; Danson κ.α., 1992; Danson & Aldakheel, 2000). Η ανάκλαση στα 1400 και 1900 nm έδειξε να ανταποκρίνεται άμεσα στην ποσότητα νερού που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς (Penuelas κ.α., 1997; Ceccato κ.α., 2001). Οι Graeff & Claupein (2007) έδειξαν ότι η ανάκλαση στα μήκη κύματος 510₇₈₀, 540₇₈₀, 490₁₃₀₀ and 540₁₃₀₀ nm μπορεί επίσης να αποτελέσει ένα δείκτη της υδατικής κατάστασης του φυτού (οι τιμές αναφέρονται στο συνδυασμό των δύο διαφορετικών φίλτρων ανάκλασης που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση). Από την άλλη όμως, η ανάκλαση στο υπέρυθρο επηρεάζεται σημαντικά από την μορφή του φυτού, την πυκνότητα φύτευσης και τη μορφή του φύλλου, παράγοντες που αυξάνουν την αβεβαιότητα της κάθε εκτίμησης (Elachi, 1987).



Εικόνα 15 Εικόνες από αισθητήρα RGB-ορατό (αριστερά) και στο κοντινό υπέρυθρο-800nm (δεξιά) για ένα φύλλο πλάτανου (*Platanus acerifolia*) το οποίο έχει τοποθετηθεί πάνω από ένα μικρότερο φύλλο (πάνω σειρά) και για δίχρωμο φύλλο κισσού (*Hedera helix L.*) (κάτω σειρά) (Lenk κ.α. 2007)

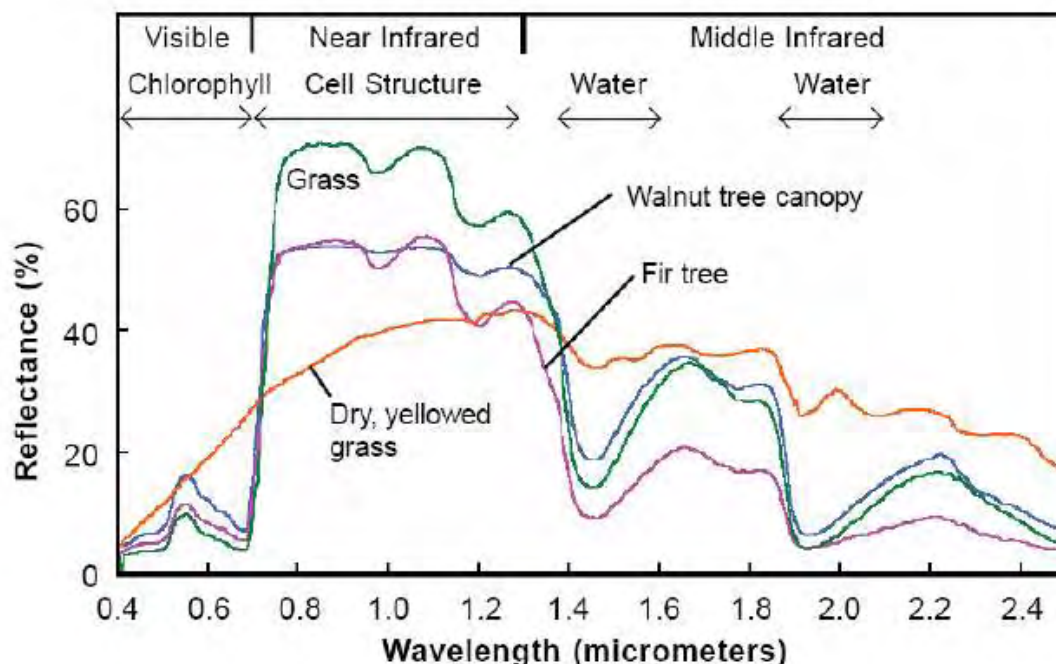
Θεωρητικές προσεγγίσεις έχουν δείξει ότι η φασματική ανάκλαση και μετάδοση μίας φυλλικής επιφάνειας είναι συνάρτηση (Εικόνα 16):

- της συνολικής φυλλικής επιφάνειας,
- ενός συντελεστή απορρόφησης,
- ενός συντελεστής διάχυσης και
- της ανάκλασης του υπόβαθρου.

Οι συντελεστές σχετίζονται με τη γεωμετρία της επιφάνειας και τις οπτικές ιδιότητες του φύλλου.

Η βασική αρχή για την αναγνώριση συνθηκών καταπόνησης μίας καλλιέργειας μέσω αισθητήρων μέτρησης της ανάκλασης οφείλεται κυρίως όχι στα ανακλαστικά χαρακτηριστικά των φύλλων αλλά στη μείωση της συνολικής φυλλικής επιφάνειας που εκτίθεται στον αισθητήρα (Knipling, 1970). Αυτή η αλλαγή μπορεί να οφείλεται σε μείωση της φυλλικής επιφάνειας ή/και αλλαγή στον προσανατολισμό – κλίση της επιφάνειας. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ανάκλαση στο υπέρυθρο τείνει να μειώνεται σχετικά εντονότερα σε σχέση με την ανάκλαση στο ορατό λόγω μείωσης στην υπέρυθρη ενίσχυση (τα φύλλα είναι σχετικά διάφανα στο υπέρυθρο (Εικόνα 15) με αποτέλεσμα πολλά επάλληλα φυλλικά επίπεδα να συνεισφέρουν στην συνολική

ανάκλαση στο υπέρυθρο και λόγω αύξησης της έκθεσης του περιβάλλοντος (π.χ. εδάφους) που κρύβονταν από τα φύλλα).



Εικόνα 16 Φάσμα ανάκλασης από φυτικές επιφάνειες διαφορετικού τύπου καθώς και από φύλλα υπό μάρανση (Smith, 2001α)

Ανακλαστικότητα και υδατική κατάσταση φύλλου και φυλλικής επιφάνειας

Η υδατική καταπόνηση είναι ένας από τους πιο κοινούς περιοριστικούς παράγοντες της ανάπτυξης και της παραγωγής τόσο σε αυτοφυή όσο και καλλιεργούμενα φυτά (Boyer, 1982; Howell και Musick, 1984). Έτσι η ανάπτυξη τεχνικών με σκοπό την όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των συμπτωμάτων υδατικής καταπόνησης σε ένα φυτικό πληθυσμό χρησιμοποιώντας μετρήσεις φασματικής ανάκλασης είναι ένας σημαντικός ερευνητικός στόχος της τηλεπισκόπησης (Kamamatsu κ.α., 1985; Jackson, 1986; Cohen, 1991).

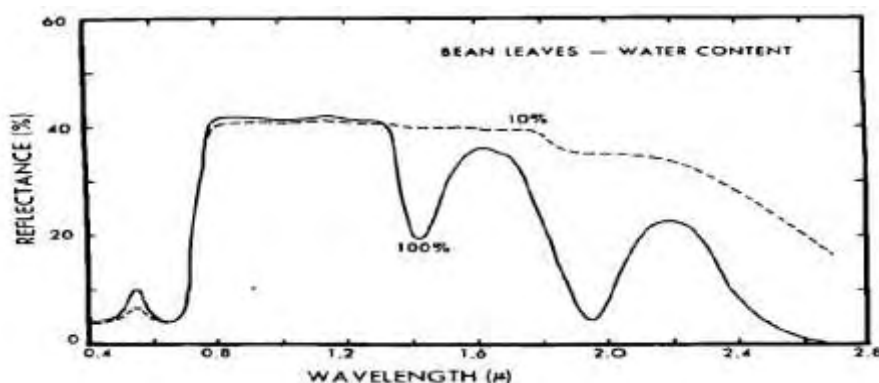
Η υδατική κατάσταση του φυτού συνήθως εκφράζεται με μία σειρά δεικτών (Πίνακας 1) με πιο χαρακτηριστικούς το σχετικό περιεχόμενο σε νερό (RWC), το υδατικό δυναμικό ή ορισμένους παράγοντές του (Ψ , πίεση σπαργής, οσμωτικό δυναμικό), τη διαπνοή και το ρυθμό φωτοσύνθεσης. Οι εκφράσεις αυτές παρέχουν μέσα για την αξιολόγηση των δεδομένων σε όρους τόσο σχετικής ποσότητας νερού στα φυτά όσο και ενεργειακού ισοζυγίου (Penñelas κ.α., 1994). Η μέτρηση των δεικτών αυτών αφορά αποκλειστικά μεμονωμένα φύλλα ή βλαστούς. Ακόμη και εάν χρησιμοποιηθεί

πλήθος τέτοιων σημειακών μετρήσεων, η αναγωγή σε συνολικά φυτά ή φυτικούς πληθυσμούς παρουσιάζει προβλήματα (Meyer κ.α., 1985), και για το λόγο αυτό οι σχετικές μελέτες για τον εντοπισμό της υδατικής κατάστασης των φυτών αφορούν μικρές χωρικές κλίμακες (Jarvis και McNaughton, 1985). Ο περιορισμός αυτός οδήγησε στην ανάγκη έρευνας για ανάπτυξη μη καταστρεπτικών, γρήγορων και αποτελεσματικών μεθόδων για την αξιολόγηση της φυσιολογικής υδατικής κατάστασης μίας ολόκληρης καλλιέργειας (Penüelas κ.α., 1993).

Η καταγραφή της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία καλλιέργεια – (φυτοκάλυψη) μπορεί να ξεπεράσει πολλά από τα προαναφερθέντα προβλήματα (Penüelas κ.α., 1992). Όσο το νερό περιορίζεται στους φυτικούς ιστούς, η διαπνοή μειώνεται και η θερμοκρασία φύλλων αυξάνεται πάνω από τη θερμοκρασία αέρα λόγω της ακτινοβολίας που απορροφάται από τα φύλλα. Έτσι η υπέρυθρη θερμομέτρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης (Jackson κ.α., 1981). Αλλά υπάρχουν και άλλοι τρόποι εκτίμησης της υδατικής κατάστασης του φυτού από απόσταση. Η ίδια η μείωση του περιεχομένου σε νερό καθώς και φυσιολογικές αντιδράσεις των φυτών που σχετίζονται με την υδατική καταπόνηση όπως αλλαγή προσανατολισμού (κλίση ή συστροφή των φύλλων) ανήκουν σε μία κατηγορία αντιδράσεων με σκοπό την μείωση της έκθεσης στον ήλιο που έχουν άμεσο αντίκτυπο στην μετρούμενη ανάκλαση από μία φυτική επιφάνεια στο ορατό και το κοντινό-υπέρυθρο τμήμα του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Sellers, 1985; Moran κ.α. 1989; Penüelas κ.α., 1992; Ceccato κ.α., 2001; Jones και Schofield, 2008). Σύμφωνα με τους Cure κ.α. (1989) και Moran κ.α. (1989), τα πρώτα σημάδια υδατικής καταπόνησης που μπορεί να καταγραφούν από αισθητήρες ανάκλασης δεν σχετίζονται τόσο στην αλλαγή στα ανακλαστικά χαρακτηριστικά των ανεξάρτητων φύλλων αλλά στην μείωση της φυλλικής επιφάνειας που εκτίθεται στους αισθητήρες. Τα εσωτερικά και εξωτερικά συμπτώματα της υδατικής καταπόνησης διαφέρουν μεταξύ των ειδών αλλά μία επίδραση δείχνει να είναι κοινή σε όλα τα είδη: η ανάκλαση του φύλλου αλλάζει –με διάφορους τρόπους και διάφορες σχέσεις- όταν αναπτύσσεται υδατικό έλλειμμα (Knippling, 1970; Sellers, 1985). Όπως έχει ήδη αναφερθεί τρεις φασματικές περιοχές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον εντοπισμό της υδατικής καταπόνησης σε καλλιέργειες. Στο ορατό (στην περιοχή των 500-600nm), στο κοντινό υπέρυθρο (NIR: 0,7-1,3μm) και στο μέσο υπέρυθρο (MIR: 1,3-3,0μm). Περιοχές απορρόφησης (λιγότερο ισχυρές) έχουν εντοπιστεί στα 760, 960, 1450, 1940 και 2950 nm.

Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ένα πλήθος από προσπάθειες σύνδεσης της ανάκλασης με την υδατική καταπόνηση. Η ανάκλαση στο υπέρυθρο φύλλων που αφυδατώνονται βρέθηκε άλλες φορές να αυξάνεται (Knippling, 1970; Gaussman,

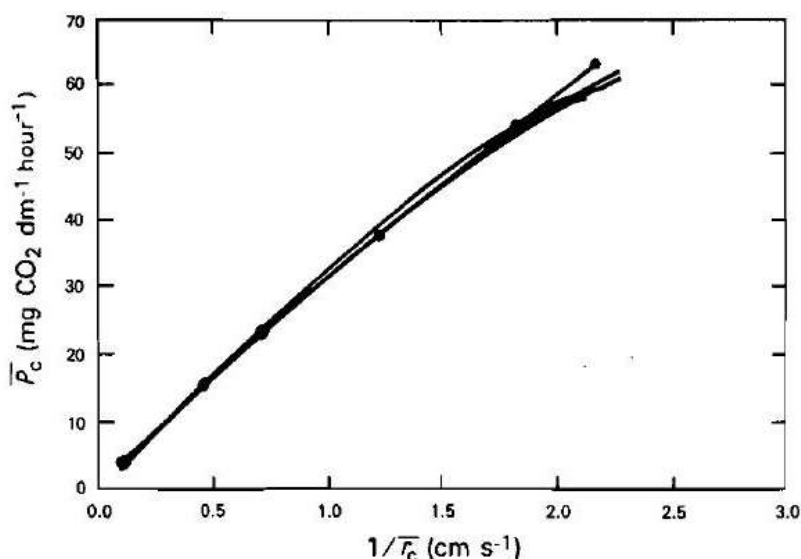
1974; Jones και Schofield, 2008), άλλες να μειώνεται (Jackson και Ezra, 1985) και άλλες να μην παρουσιάζει σημαντικές διαφορές (Labovitz κ.α. 1984), ανάλογα με το είδος του φυτού και το είδος της καταπόνησης (ασθένειες, προσβολές από έντομα, τροφοπενίες, υδατική καταπόνηση, αλατότητα κοκ). Σύμφωνα με τον Knipling (1970) η αύξηση εξηγείται επειδή παρόλο που ο εσωτερικός όγκος του φύλλου μειώνεται οι αεροφόροι χώροι παραμένουν μεταξύ των τοιχωμάτων και μπορεί το μέγεθος των επιφανειών διεπαφής να αυξάνει καθώς γειτονικά κύτταρα χωρίζονται και το ζωντανό περιεχόμενο των κυττάρων συρρικνώνεται και απομακρύνεται από τα τοιχώματα. Ακόμη η ο επαναπροσανατολισμός των κυτταρικών τοιχωμάτων και η απομάκρυνση του νερού από τις επιφάνειες των τοιχωμάτων μέσα στο μικροινώδες δίκτυο μπορεί να αυξάνει την ικανότητά τους για διάχυση της ακτινοβολίας και έτσι να συμβάλουν στην αύξηση της ανάκλασης από το φύλλο. Όταν παράγοντες όπως ασθένειες ή φυσιολογικές καταπονήσεις –συμπεριλαμβανομένης και της υδατικής καταπόνησης– επηρεάζουν άμεσα τις ανακλαστικές ιδιότητες των φύλλων, οι περισσότερο εμφανείς αρχικές αλλαγές συνήθως συμβαίνουν στην ορατή περιοχή του φάσματος παρά στην υπέρυθρη λόγω της ευαισθησίας της χλωροφύλλης στις φυσιολογικές διαταραχές. Καθώς η χλωροφύλλη εκφυλίζεται και απορροφά λιγότερο αποτελεσματικά το φως η ανάκλαση στο ορατό αυξάνεται. Στην Εικόνα 17 (Knipling, 1970) παρουσιάζεται η ανάκλαση από δύο φύλλα φασολιού, με διαφορετική υγρασία (πλήρως ενυδατωμένο -100% υγρασία και σχεδόν αφυδατωμένο 10% υγρασία). Η διαφορά είναι μεγάλη στην περιοχή του υπέρυθρου (>1300nm) λόγω της μείωσης της απορρόφησης που προκαλείται από την έλλειψη νερού στο αφυδατωμένο φύλλο. Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει και η διαφορά στις περιοχές των 500 και 800nm.



Εικόνα 17 Η επίδραση της αφυδάτωσης του φύλλου στην ανάκλαση από φύλλα φασολιού (100% - πλήρως ενυδατωμένο φύλλο) (Knipling, 1970)

Σύμφωνα με τον Sellers (1985), η λειτουργική σχέση της φωτοσύνθεσης με την αντίσταση φυτικής επιφάνειας στην κίνηση του νερού (r_c) και κατά συνέπεια με τον

ρυθμό διαπνοής (Εικόνα 18) επιτρέπει τη υπόθεση ότι πολυφασματικά δεδομένα ανάκλασης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών. Σε κάθε περίπτωση όμως ο συγγραφέας σημειώνει ότι σημαντικά προβλήματα μπορεί να προκληθούν από τους θορύβους των μετρήσεων (ανάκλαση λόγω ανθέων, σκιάσεων, ασθενειών κοκ).



Εικόνα 18 Σχέση μεταξύ φωτοσύνθεσης και αντίστασης στη διαπνοή για καλλιέργεια αραβόσιτου (Sellers, 1985)

Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται με το χρόνο και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η ανάκλαση σε ένα μήκος κύματος είναι χρήσιμη μόνο για τον εντοπισμό περιοχών του φάσματος που σχετίζονται με την υδατική κατάσταση και όχι για το χαρακτηρισμό μίας φυτικής επιφάνειας (Hatfield κ.α., 1985). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με το συνδυασμό δεδομένων από δύο ή περισσότερα μήκη κύματος σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό φυτικούς φασματικούς δείκτες (Jackson και Huete, 1991; Sarlikioti κ.α., 2010 και 2011).

Σύμφωνα με τους Thenkabail κ.α. (2000) η ανάκλαση στην περιοχή του φάσματος μεταξύ 300 και 1050nm παρέχει σημαντικούς δείκτες για την καταγραφή φυσιολογικών ιδιοτήτων των φυτών και κυρίως του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, του ποσοστού κάλυψης του εδάφους, της βιομάζας και του νωπού και ξηρού βάρους. Οι Zalaluk και Sri Ranjan (2007 and 2008) κατηγοριοποίησαν τις βασικές μορφές φασματικών δεικτών που χρησιμοποιούνται και για την εκτίμηση της υδατικής καταπόνησης:

- οι απλοί λόγοι (simple ratio - SR) είναι το πηλίκο της ανάκλασης σε δύο μήκη κύματος,
- οι κανονικοποιημένες διαφορές (normalized difference vegetation indices NDVI) υπολογίζονται διαιρώντας την διαφορά στην ανάκλαση σε δύο μήκη κύματος με το άθροισμα αυτών.

$$\frac{R_{\text{NIR}}}{R_{\text{RED}}} \quad \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}}$$

Εξίσωση 11 Βασικές μορφές φασματικών φυτικών δεικτών

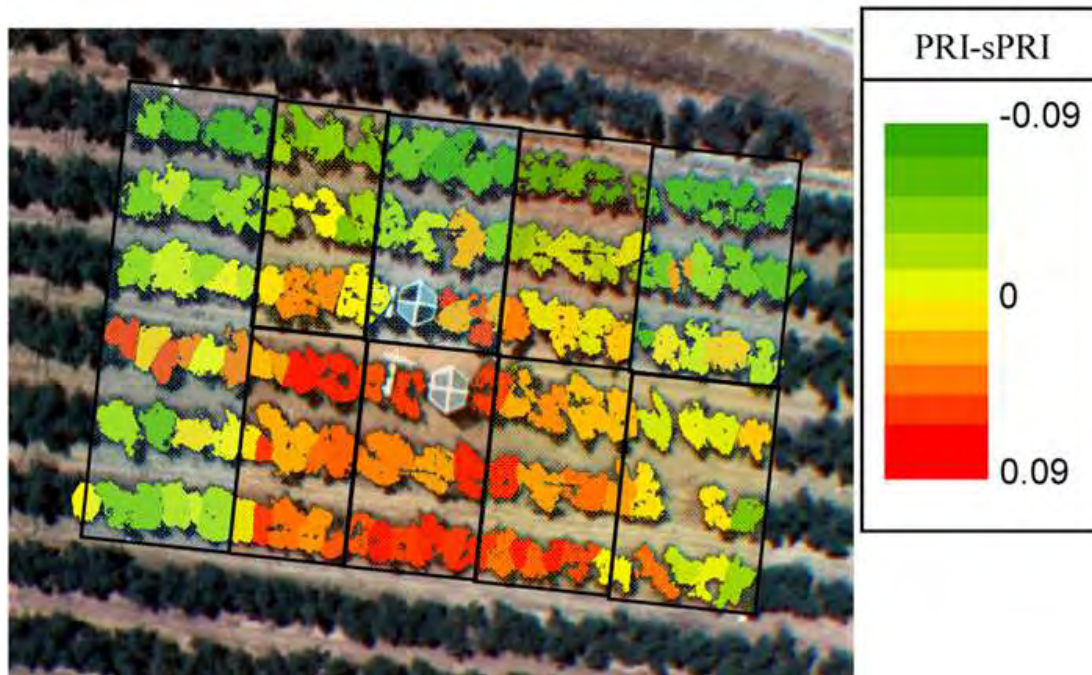
Ο Sellers (1985) παρουσιάζει ενδείξεις ότι ο Simple Ratio (SR = NIR / RED ή VIS όπου NIR, RED και VIS είναι η ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο, στο κόκκινο και στο ορατό τμήμα του φάσματος) θα μπορούσε να δώσει πληροφορία σχετικά με την διαπνοή. Σε υδατικά καταπονημένη καλλιέργεια μηδικής παρατηρήθηκε μείωση της ανάκλασης τόσο στο ορατό κόκκινο (IR) όσο και στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) (Moran κ.α., 1989). Οι Cure κ.α. (1989) συσχέτισαν την θερμοκρασία αέρα μέσα στο φύλλωμα, τη διαφορά θερμοκρασίας φύλλου-αέρα και τη θερμοκρασία φύλλου με την ανάκλαση στο ορατό κόκκινο (red, 620nm), στο κοντινό υπέρυθρο (NIR, 850nm) και με το λόγο αυτών (NIR/Red) και βρήκαν υψηλούς συντελεστές συσχέτισης (R^2) μεταξύ των φασματικών μετρήσεων και της θερμοκρασίας φύλλου (μέσες τιμές ανάκλασης σε σχέση με μέσες τιμές θερμοκρασίας το μεσημέρι όταν είχε αναπτυχθεί πλήρως υδατική καταπόνηση (εξαιρούσαν ημέρες που ήταν κοντά στην άρδευση)). Η μεταχείριση που βρισκόταν υπό εντονότερη υδατική καταπόνηση είχε γενικά μεγαλύτερη ανάκλαση στο ορατό κόκκινο (620nm) και μικρότερη στο κοντινό υπέρυθρο (850nm) σε σχέση με αυτή που αρδευόταν πλήρως. Ακόμη κατέληξαν ότι το μέγεθος του φυτού έχει μεγάλη επίδραση στην ανάκλαση από αυτό. Ο Carter (1991) κατέληξε ότι το RWC συσχετίζονταν έντονα με την ανάκλαση στην περιοχή του φάσματος γύρω από τα 480nm. Οι Riggs κ.α. (1991) μελέτησαν την δυνατότητα χρήσης της ανάκλασης στο NIR (1000-1300nm) για εντοπισμό υδατικής καταπόνησης σε κωνοφόρα. Βρήκαν ότι διαφοροποίηση στην ανάκλαση υπάρχει μόνο όταν υπάρχει πολύ έντονη υδατική καταπόνηση, ότι η διαφοροποίηση αυτή δεν αφορά τη μορφή της καμπύλης ανάκλασης αλλά το μέγεθός της και κατέληξαν στο ότι η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή.

Οι Hunt και Rock (1989) αξιολόγησαν τη χρήση του MSI (Moisture Stress Index, R1600/R820) σε σχέση με την μεταβολή του RWC (Relative Water Content) και κατέληξαν στο ότι η ελάχιστη αλλαγή του RWC που μπορούσε να ανιχνευθεί από τον MSI είναι της τάξης του 50%, γεγονός που τον καθιστά πρακτικά μη χρήσιμο.

Εμπνεόμενοι από τις προσπάθειες του Jones (1999), οι Ben-Asher κ.α. (1992), εφάρμοσαν υπέρυθρη θερμομετρία (infrared thermometry IRT) με σκοπό την εκτίμηση της ET και τον υπολογισμό του CWSI και εντόπισαν αποδεκτή συσχέτιση μεταξύ CWSI και ET καθώς και μεταξύ CWSI και ψ_l (leaf water potential). Το συμπέρασμά τους ήταν ότι ο συνδυασμός IRT, CWSI και ET για τη διαχείριση δεν μπορούν να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα σε άρδευση μεγάλης συχνότητας.

Οι Penñelas κ.α. παρουσίασαν το 1993 τον WBI (Water Band Index) = R_{970}/R_{902} (τα 970 επιλέχθηκαν επειδή βρίσκονταν στην περιοχή απορρόφησης από το νερό, ενώ τα 900 ως τιμή αναφοράς) και τους d_{NIRmin} και ld_{NIRmin} (ο πρώτος είναι το ελάχιστο της πρώτης παραγώγου στην περιοχή NIR και ο δεύτερος το μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε αυτό το ελάχιστο). Τα πειράματά τους αφορούσαν ζέρμπερα, πιπεριά και φασολιά. Στην ζέρμπερα η ανάκλαση στην περιοχή των 950-970nm μειώνονταν καθώς αυξάνονταν η υδατική καταπόνηση και ο δείκτης ακολουθούσε την αλλαγή αυτή αλλά η ένδειξη ήταν ισχυρή μόνο όταν η υδατική καταπόνηση ήταν ήδη έντονη. Ο δείκτης d_{NIRmin} και ακόμη περισσότερο ο ld_{NIRmin} είχαν επίσης άμεση απόκριση στην μεταβολή της υδατικής κατάστασης. Η μέγιστη απόκριση δίνονταν από φυτά που έχαναν έντονα την ελαστικότητα των κυτταρικών μεμβρανών λόγω υδατικής καταπόνησης. Σημείωσαν δε ότι οι δείκτες αυτοί μπορεί να είναι χρήσιμοι όταν δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στο δείκτη φυλλικής επιφάνειας και τα φυτά καλύπτουν πλήρως το έδαφος.

Συνεχίζοντας την προσπάθεια αξιολόγησης φασματικών δεικτών οι Penñelas κ.α. (1994) μελέτησαν την επίδραση της υδατικής κατάστασης στην ανακλαστικότητα φύλλων ηλιοτροπίων και βρήκαν ότι οι δείκτες PRI (Physiological Reflectance Index) = $(R_{550} - R_{530}) / (R_{550} + R_{530})$ και NDVI = $(R_{850} - R_{680}) / (R_{850} + R_{680})$ μειώνονται υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης. Κατέληξαν ότι ο PRI φαίνεται να έχει μεγάλη συσχέτιση με την υδατική κατάσταση του φύλλου. Ένα ακόμη σημαντικό εύρημα ήταν ότι ενώ οι περισσότερες έως τότε μελέτες αφορούσαν μεγάλα χρονικά διαστήματα (από ημέρα και πάνω), το χρονικό εύρος στην συγκεκριμένη εργασία ήταν 2 ώρες.



Εικόνα 19 Εντοπισμός υδατικής καταπόνησης με χρήση του PRI (-0.09 επαρκώς αρδευόμενα φυτά, 0.09 φυτά υπό υδατική καταπόνηση). Το sPRI: είναι ο εκτιμώμενος PRI για μη-καταπονημένα φυτά όπως υπολογίζεται μέσω μαθηματικών προσομοιωμάτων (Zarco-Tejada et al., 2008)

Οι Zeiger κ.α. (2002) εντόπισαν ότι οι χλωροπλάστες των καταφρακτικών κυττάρων των στοματίων διεγείρονται κυρίως από την ακτινοβολία στην περιοχή του μπλε, με το μέγεθος του ανοίγματος των στοματίων να είναι ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα φύλλα. Οι Thenot κ.α. (2002) αξιολόγησαν ένα δείκτη με μορφή παρόμοια με αυτή του PRI. Ο δείκτης τους υπολογιζόταν από τη σχέση $(R531 - R570) / (R531 + R570)$ μετρώντας ανάκλαση από φύλλα σε δύο διαφορετικά φυτά (*Chenopodium quinoa* (Willd.) και *Arbutus unedo* (L.)) και συσχετίζοντας τις μετρήσεις με το υδατικό δυναμικό του φύλλου. Ο δείκτης βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση της υδατικής καταπόνησης και το συμπέρασμα ήταν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό περιορισμούς για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών (σε πολύ έντονη υδατική καταπόνηση παρεμβολές που οφείλονται στην μάρανση–δομική μεταβολή του φύλλου οδηγούν σε αλλαγές στην ανάκλαση και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο υπό μέτρια υδατική καταπόνηση). Οι Schlemmer κ.α. (2005) βρήκαν ότι σε φύλλα καλαμποκιού (*Zea mays* L.) το σχετικό περιεχόμενο σε νερό (RWC) είχε μία εντονότερη αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την ανάκλαση στην περιοχή του μπλε σε σχέση με αυτή στην περιοχή του κόκκινου. Οι Zarco-Tejada et al. (2008) κατέληξαν ότι ο PRI μπορεί να αποτελέσει τη

βάση για την ανάπτυξη μεθοδολογιών εκτίμησης της υδατικής καταπόνησης σε λειτουργικό επίπεδο (Εικόνα 19).

Με την αξιολόγηση του PRI ασχολήθηκαν και οι Suárez κ.α. (2009, α και β) μελετώντας με τη χρήση χρονοσειρών την δυνατότητα χρήσης του ως δείκτη εντοπισμού υδατικής καταπόνησης σε καρποφόρα δένδρα και μεγάλες καλλιέργειες. Στο ίδιο πλαίσιο αναζήτησαν τρόπους εκτίμησης του δείκτη που αντιστοιχεί σε πλήρως αρδευόμενα φυτά -χρησιμοποιώντας μοντέλα μεταφοράς ενέργειας με ακτινοβολία- με βάση την μορφολογία των φύλλων, το περιεχόμενο σε χλωροφύλλη και το δείκτη φυλικής επιφάνειας (LAI). Τα αποτελέσματα έδειξαν διαφορετική απόκριση ανάλογα με το είδος του φυτού, αλλά κατέληξαν ότι σε κάποιες καλλιέργειες ο PRI μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ένδειξης υδατικής καταπόνησης πολύ πριν γίνουν ορατά τα σημάδια αυτής. Το 2010, οι Sarlikioti κ.α., έκαναν μία εις βάθος παρουσίαση των φυσιολογικών μηχανισμών που δικαιολογούν την μελέτη του PRI ως δείκτη εντοπισμού υδατικής καταπόνησης και κατέληξαν – μετά από πειράματα που διεξήχθησαν μέσα σε θερμοκήπιο- ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και για τον εντοπισμό πρόωρης υδατικής καταπόνησης αλλά σε υψηλά επίπεδα έντασης ηλιακού φωτός ($>700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Ο Ceccato κ.α. (2001), αναφέρουν ότι η ανάκλαση στο υπέρυθρο (SWIR shortwave infrared 1400-2500nm) σε συνδυασμό με αυτή στο κοντινό υπέρυθρο (NIR) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της περιεκτικότητας του φύλλου σε νερό. Μάλιστα βρήκαν ότι τα μήκη κύματος 1530 και 1720nm είναι τα πλέον κατάλληλα για το σκοπό αυτό. Όσο αφορά τη διαφοροποίηση γύρω από τα 500nm σε υδατικά καταπονημένα φύλλα τονίζουν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ χλωροφύλλης και περιεχομένου σε νερό αλλά δεν είναι εύκολο να απομονωθεί καθώς ο τρόπος μεταβολής της χλωροφύλλης εξαρτάται από το είδος του φυτού και μπορεί να προκαλείται και από τροφοπενίες, ασθένειες, τοξικότητες, σύσταση της ατμόσφαιρας κ.ο.κ. Βρήκαν ακόμη ότι ο MSI έχει πολύ καλή συσχέτιση με το περιεχόμενο του φύλλου σε νερό. Ενδείξεις ότι απλοί δείκτες ανάκλασης στην υπέρυθρη περιοχή μπορούν να εντοπίσουν θερμοκρασιακές και υποβαλλόμενες από το περιεχόμενο σε νερό αλλαγές στην εκπομπή υπό σταθερό φωτισμό και εξ αυτού να δίνουν γρήγορες εκτιμήσεις της καταπόνησης έχουν καταγραφεί από τους Dobrowski κ.α. (2005).

Οι Kacira και Ling (2001) μελέτησαν την δυνατότητα ανάπτυξης ενός συστήματος ελέγχου της κατάστασης των φυτών όπου κανένας αισθητήρας δεν θα ερχόταν σε επαφή με τα φυτά. Έτσι εκτός από συμβατικούς αισθητήρες μέτρησης παραμέτρων του περιβάλλοντος χρησιμοποίησαν και υπέρυθρη θερμομετρία αλλά και εικόνες στην περιοχή του ορατού. Εκτός του δείκτη υδατικής καταπόνησης χρησιμοποίησαν και τον TPCA (Top projected canopy area) για τον έλεγχο της υδατικής κατάστασης

στη λογική ότι το εμβαδόν της κάτοψης των φυτών ελαττώνεται υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης (λόγω χαλάρωσης, συστροφής και πτώσης φύλλων). Σε συνέχεια της έρευνας τους στο πεδίο αυτό οι Kacira και Ling (2002) προσπάθησαν να εντοπίσουν τιμές του δείκτη που δείχνουν αρχόμενη υδατική καταπόνηση ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση της άρδευσης. Τα πειράματα αφορούσαν καλλιέργεια Ιμπάτιενς (New Guinea Impatiens) σε ειδικό θάλαμο και η τεχνική τους μπορούσε να προβλέψει υδατική καταπόνηση 1-2 ημέρες πριν αυτή γίνει αντιληπτή από ορατά συμπτώματα (όμως αυτό δεν μπορεί να ελέγξει ένα σύστημα που αναμένεται να αρδεύει 5-10 φορές την ημέρα όπως γίνεται π.χ. στην υδροπονία σε Μεσογειακό κλίμα το καλοκαίρι).

Τα τελευταία χρόνια η ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με τη δυνατότητα εφαρμογής δεικτών ανάκλασης παραμένει έντονη. Μία σχετικά πρόσφατη εργασία (Inoue and Penuelas, 2006) σχετικά με την καταλληλότητα ή όχι του PRI ως δείκτη υδατικής κατάστασης των φυτών, τονίζει ότι η ευαισθησία του PRI στο περιεχόμενο του εδάφους σε νερό δεν βρίσκεται σε πρακτικά αξιοποιήσιμα επίπεδα όταν η υγρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη από 20-25 % (v/v). Οι Eitela κ.α. (2006) δημοσίευσαν αξιολόγηση φασματικών δεικτών σε επίπεδο φύλλο και φυτοκάλυψης για εντοπισμό υδατικής καταπόνησης λεύκας. Αξιολογήθηκε μία σειρά από δείκτες όπως π MDWI (Maximum Difference Water Index), ο Normalized Differential Water Index (NDWI), ο Red Edge Inflection Point (REIP), και ο Water Index (WI). Τα αποτελέσματα ότι οι δείκτες αυτοί δεν αποτελούν βιώσιμη επιλογή για τον εντοπισμό χαμηλών ή μέσων επιπέδων υδατικής καταπόνησης. Οι El-Shikha κ.α. (2007) προσπάθησαν να διαχωρίσουν τα σήματα που προέρχονταν από καταπόνηση λόγω έλλειψης ύδατος και N. Στη μελέτη που αφορούσε καλλιέργεια μπρόκολου στον αγρό, χρησιμοποιήθηκε επίγειο καταγραφικό ανάκλασης σε συγκεκριμένα μήκη κύματος 550, 670, 720 και 790nm καθώς και θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι δείκτες RVI, NDVI, NDNG δεν μπορούσαν να ξεχωρίσουν τα δύο είδη καταπόνησης ενώ ο δείκτης WDI έδινε πληροφορίες για την υδατική κατάσταση ανεξάρτητα από τα επίπεδα N. Οι Antunez κ.α. (2008) εντόπισαν συσχέτιση της ανάκλασης σε διάφορα μήκη κύματος (αλλά κυρίως στην περιοχή του ορατού, 490-700nm) με το υδατικό δυναμικό των βλαστών σε δένδρα κερασιάς (*Prunus avium* L.). Η εταιρεία κατασκευής αισθητήρων φασματικής καταγραφής CropScan (προσωπική επικοινωνία, 2008) εντόπισε ότι στην περιοχή μεταξύ κίτρινου και κόκκινου (περίπου 560 - 710 nm) η ανάκλαση τείνει να αυξάνεται καθώς αυξάνεται η υδατική καταπόνηση (μάλιστα σε όρους χρώματος τα φύλλα παίρνουν καφέ απόχρωση) ενώ στη περιοχή του κοντινού υπέρυθρου (περίπου λίγο πάνω από τα 760 nm) η ανάκλαση τείνει να ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η υδατική καταπόνηση. Οι Seelig

κ.α. (2009), αξιολόγησαν τον δείκτη NIRLWI (Near Infrared Leaf Water Index, R1300/R1450) σε φυτά με διαφορετική ικανότητα οσμωτικής ρύθμισης (μπιζέλι, φασόλι και ζαχαρότευτλο). Βρήκαν ότι ο δείκτης ακολουθεί την διακύμανση του σχετικού περιεχομένου σε νερό (RWC) και μάλιστα με γραμμική σχέση όσο αφορά το μπιζέλι και το φασόλι. Για τα ζαχαρότευτλα η σχέση δεν είναι γραμμική ενώ υπάρχει και διαφορά φάσης στην απόκριση. Οι Koksai κ.α. (2011) μελέτησαν επίσης ζαχαρότευτλα με φορητό ραδιόμετρο και βρήκαν ότι υπό υδατική καταπόνηση, οι τιμές της ανάκλασης στην περιοχή από 650 έως 720nm αυξάνουν και από 720 έως 1100nm μειώνονται σε σχέση με επαρκώς αρδευόμενες μεταχειρίσεις. Ακόμη η ανάκλαση στις περιοχές 650-720nm και 720-1100nm έχει περισσότερες κοντινές τιμές μεταξύ τους σε μεταχειρίσεις υπό υδατική καταπόνηση.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η εφαρμογή και μελέτη μεθόδων τηλεπισκόπησης με σκοπό τον εντοπισμό μηκών κύματος που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης σε καλλιέργειες υπό κάλυψη. Οι Prenger κ.α. (2004 και 2005) ανέπτυξαν και αξιολόγησαν συστήματα ελέγχου άρδευσης που μεταξύ των άλλων χρησιμοποιούσαν και θερμική απεικόνιση της καλλιέργειας. Η επιλογή βασίστηκε στην άμεση σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας φύλλου και της στοματικής αγωγιμότητας που θεωρείται άριστος δείκτης επερχόμενης υδατικής καταπόνησης. Οι Granta κ.α. (2006) αξιολόγησαν την δυνατότητα εκτίμησης της υδατικής καταπόνησης μέσω θερμικής απεικόνισης εντός θερμοκηπίου. Συμπέραναν ότι υπάρχει προοπτική πρακτικής εφαρμογής της μεθόδου αρκεί να συνοδεύεται από μία σειρά μετρήσεων παραμέτρων του περιβάλλοντος. Οι Graeff και Claudein (2007), χρησιμοποίησαν τεχνικές τηλεπισκόπησης εντός θερμοκηπίου. Οι μετρήσεις γίνονταν σε χρονικό εύρος εβδομάδας υπό ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού και αφορούσαν μήκη κύματος από 380 έως 1300nm. Τα μήκη κύματος 490, 510, 540, 780, και 1300 nm βρέθηκε να είναι τα πιο κατάλληλα για την περιγραφή της υδατικής κατάστασης ανεξάρτητα από το στάδιο ανάπτυξης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι φασματικοί δείκτες στην περιοχή του ορατού. Η ανάκλαση στο ορατό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη για την υδατική κατάσταση του φυτού (Carter, 1991; Schlemmer κ.α. 2005; Wheeler, 2006). Δείκτες που βασίζονται σε εικόνες RGB έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Kanemasu 1974; Murase κ.α. 1995; Gamon και Surfes 1999; Gitelson κ.α. 2002). Οι Zalaluk και Sri Ranjan (2007 and 2008) αξιολόγησαν την δυνατότητα χρήσης των εικόνων RGB μίας κοινής ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής των 5-megapixel για την εκτίμηση του υδατικού δυναμικού του φύλλου (Ψ_{leaf}) καλλιέργειας πατάτας σε θερμοκήπιο. Επειδή περισσότερη πληροφορία σχετικά με τη σχέση ανάκλασης και φυτοκομικής κατάστασης μπορεί να εξαχθεί μετά από επεξεργασία των εικόνων και

υπολογισμό σχετικών δεικτών (Asrar et al. 1984; Jackson and Huete 1991) χρησιμοποίησαν μοντέλα νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Network - ANN) για την ανάλυση των εικόνων και κατέληξαν σε μία σειρά από θετικά αποτελέσματα όσο αφορά την πρακτική χρήση εικόνων RGB για εκτίμηση του Ψ_{leaf} .

Χρήση δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο

Τυπικά, οι κλιματικοί παράγοντες στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου σε επίπεδο "μακροκλίματος" (όπως είναι η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα κοκ) ελέγχονται χρησιμοποιώντας μετρήσεις από ένα ή περισσότερα σημεία που θεωρούνται αντιπροσωπευτικά του συνολικού όγκου του θερμοκηπίου. Όμως το "μικροκλίμα" στην περιοχή της καλλιέργειας παίζει καθοριστικό ρόλο για τις διαδικασίες ανταλλαγής ενέργειας και μάζας μεταξύ φυτών και αέρα που τα περιβάλλει. Το "μικροκλίμα" επηρεάζεται όχι μόνο από τις συνθήκες του "μακροκλίματος" αλλά και από τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών.

Στην πιο επιτυχημένη τους έκφραση οι δείκτες θερμικής και υδατικής καταπόνησης των καλλιεργειών –που λαμβάνουν υπόψη το συνδυασμό των συνθηκών του περιβάλλοντος αλλά και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών- θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη γενικότερη διαχείριση μηχανισμών (όπως τα ανοίγματα αερισμού ή η κουρτίνα σκίασης) και συσκευών (όπως τα αερόθερμα ή η υδρονέφωση) με σκοπό τον έλεγχο του κλίματος εντός του θερμοκηπίου.

Οι Stanghellini και Van Meurs (1992) μελέτησαν τη δυνατότητα ελέγχου θερμοκρασίας και υγρασίας εντός του θερμοκηπίου μέσω ορισμού σημείων ρύθμισης εξατμισοδιαπνοής σε καλλιέργεια τομάτας. Ένα απλό μοντέλο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (με βάση την θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα που περιβάλλει την κόμη της καλλιέργειας καθώς και την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία) αναστρέφεται για τον υπολογισμό ζευγών θερμοκρασίας και υγρασίας που αντιστοιχούν στην ζητούμενη εξατμισοδιαπνοή και στη μετρούμενη ακτινοβολία. Επιπλέον περιορισμοί (π.χ. ελαχιστοποίηση των αναγκών θέρμανσης) συντελούν στην επιλογή του ζεύγους που θα επιλεγεί τελικά. Τα αποτελέσματά τους ήταν απλά ενθαρρυντικά αποδεικνύοντας ότι σε ένα βαθμό η χρήση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής (και προφανώς οποιουδήποτε δείκτη, θερμικού, υδατικού κοκ, που συσχετίζεται με το ρυθμό αυτό) για τη ρύθμιση βασικών παραγόντων του εναέριου περιβάλλοντος είναι δυνατή. Ο Baille (1992) εξετάζει τις δυνατότητες αξιοποίησης της καταγραφής της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας όσο αφορά τις γενικότερες αποφάσεις διαχείρισης του κλίματος εντός του θερμοκηπίου. Θέτει ερωτήματα

σχετικά με το ποιες διεργασίες πρέπει να παρακολουθούνται, ποιες είναι οι κατάλληλες θέσεις των αισθητήρων στο πλαίσιο του συνεχούς υπόστρωμα-φυτό-ατμόσφαιρα καθώς και το πώς μπορούν να αξιοποιηθούν οι μετρήσεις. Ειδικό βάρος δίνεται στους αισθητήρες υπέρυθρης θερμομετρίας (infrared thermometry - IRT) οι οποίοι παρουσίαζαν καλές δυνατότητες εφαρμογής για τον έλεγχο του κλίματος.

Ο Baker (1995) παρουσιάζει τις τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάζονται όσο αφορά την πρακτική εφαρμογή των μετρήσεων θερμικής και υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας με σκοπό το συνολικό έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Εκτενέστερη είναι η σχετική ανασκόπηση των Ehret κ.α. (2001). Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής γίνεται αναφορά στη δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων τηλεπισκόπησης (που είχαν εφαρμοστεί ήδη με επιτυχία σε συνθήκες αγρού με χρονική ευαισθησία ημερών, για διαχείριση καλλιεργειών με βάση φυσιολογικούς δείκτες όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας) στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην για μία ακόμη φορά στην υπέρυθρη θερμομετρία και τη δυνατότητα αξιοποίησής στο πλαίσιο ενός συστήματος ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, το έλλειμμα πίεσης κορεσμού (ενός βασικού παράγοντα της εξατμισοδιαπνοής) που κατά τη συνήθη τακτική εκτιμάται μέσω μετρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα, μπορεί να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια στο πλαίσιο υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής εάν στον υπολογισμό του ληφθεί υπόψη η θερμοκρασία κόμης. Οι Ehret κ.α. (2001) καταλήγουν στο ότι πιθανότατα η μέτρηση της συνολικής φωτοσύνθεσης του φυτού έχει την καλύτερη δυναμική μεταξύ των καταγραφών φυσιολογικών παραμέτρων με σκοπό τον άμεσο έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων. Σε κάθε περίπτωση όμως η πρακτική χρήση τέτοιων προσεγγίσεων δεν φαινόταν άμεση. Ο Seginer (2002) συνδύασε την εξίσωση Penman-Monteith με ένα κοινά χρησιμοποιούμενο μοντέλο αερισμού με σκοπό την πρόβλεψη του ρυθμού ψύξης στο θερμοκήπιο ως συνάρτηση παραμέτρων του περιβάλλοντος και της καλλιέργειας. Από τη στιγμή που η χρησιμότητα ενός τέτοιου μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους συντελεστές του μοντέλου Penman-Monteith για τη συγκεκριμένη κάθε φορά καλλιέργεια, ο Seginer παρήγαγε μια σειρά από σχετικούς συντελεστές βασιζόμενος σε βιβλιογραφικά δεδομένα. Η εργασία αυτή καταδεικνύει ξεκάθαρα τις δυσκολίες εύρεσης αξιόπιστων τιμών για τους συντελεστές παρουσιάζοντας την αρνητική συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ της ακτινοβολίας και του ελλείμματος πίεσης κορεσμού.

Στο άρθρο ανασκόπησης των Kacira κ.α. (2005) τονίζεται η αξία της καταγραφής των δυναμικών αποκρίσεων των φυτών και της αξιοποίησής αυτών στο πλαίσιο μοντέλων διαχείρισης του κλίματος στα θερμοκήπια. Στο πλαίσιο αυτό αναφέρονται

στη χρήση φασματικών μετρήσεων (στο ορατό, το κοντινό υπέρυθρο και το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) με σκοπό την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την απόκριση των φυτών και παραθέτουν μία σειρά από σχετικούς δείκτες (RVI, DVI, NDVI κ.ο.κ.). Η υπέρυθρη θερμομετρία εξακολουθεί να παρουσιάζεται ακόμη ως ενδιαφέρουσα τεχνική για τον υπολογισμό δεικτών (SDD, TSD, CWSI κ.ο.κ.) που μπορούν να εισαχθούν σε μοντέλα διαχείρισης του μικροκλίματος. Οι Blasco κ.α. (2007) ανέπτυξαν και αξιολόγησαν συστήματα ελέγχου του κλίματος (θερμοκρασία και υγρασία) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου βασισμένα σε γενετικούς αλγόριθμους που βασίζονται στην κατανάλωση ενέργειας και νερού.

Παρόλο που πολλοί δείκτες θερμικής και υδατικής καταπόνησης (όπως ο CWSI) έχουν γίνει γενικά αποδεκτοί ως πολύτιμα εργαλεία για τη διαχείριση της άρδευσης στο θερμοκήπιο με μεγάλες δυνατότητες να εισαχθούν και σε εμπορικά συστήματα διαχείρισης παραμέτρων περιβάλλοντος (Prenger κ.α., 2005; Ben Asher κ.α., 2008), η μόνη εμπορική χρήση σχετικού δείκτη σήμερα, είναι η ένδειξη του υπέρυθρου θερμόμετρου. Τα θερμόμετρα αυτά αποτελούν ήδη βασικό εξοπλισμό στα περισσότερα θερμοκήπια με σκοπό την μέτρηση της θερμοκρασίας των φυτών και των υποστρωμάτων με σκοπό την λήψη αποφάσεων σχετικά με το χειρισμό των συστημάτων θέρμανσης αέρα και υποστρώματος αντίστοιχα. Σχετικό εμπορικό σύστημα αποτελεί το SmartCrop (SmartField, 2011, Εικόνα 20). Η τεχνολογία του βασίζεται στην πατέντα BIOTIC (Biologically Identified Optimal Temperature Interactive Console). Στην ουσία χρησιμοποιεί ένα υπέρυθρο αισθητήρα θερμοκρασίας για να μετρά τη θερμοκρασία φύλλου και να αντιλαμβάνεται την υδατική καταπόνηση σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του αέρα. Το σύστημα συνδυάζεται και με αισθητήρες εδαφικής υγρασίας και αισθητήρες ανάπτυξης του φυτού ώστε να έχει μια συνολική εικόνα του συνεχούς έδαφος-φυτό-αέρας.



Εικόνα 20 Το σύστημα SmartCrop (Smartfield, 2011)



Εικόνα 21 Το σύστημα CropView (Hortimax, 2011)

Ακόμη υπάρχουν διαθέσιμα κάποια συστήματα λήψης εικόνων στο χώρο του θερμοκηπίου (δηλαδή υπό την ευρεία έννοια ανάκλασης στην περιοχή του ορατού). Χαρακτηριστικό είναι το σύστημα CropView της Hortimax (2011) το οποίο αποτελείται από μία φωτογραφική κάμερα υψηλής ανάλυσης που συνδέεται με υπολογιστή ελέγχου του θερμοκηπίου. Το σύστημα καταγράφει την κατάσταση και την ανάπτυξη της καλλιέργειας σε εικόνες (γενικά πλάνα και εστιασμένα σε περιοχές ενδιαφέροντος) που μπορούν να συγκριθούν με το ιστορικό διακύμανσης παραμέτρων που αφορούν το κλίμα και το υπόστρωμα με σκοπό την υποβοήθηση λήψης αποφάσεων σχετικά με τη ρύθμιση των παραμέτρων αυτών από τον διαχειριστή.

Δυνατότητες εφαρμογής δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών

Οι πιο χαρακτηριστικές αντιδράσεις των φυτών όσο αφορά την υδατική καταπόνηση σχετίζονται με κλείσιμο στοματίων, μείωση ρυθμού φωτοσύνθεσης, μείωση ανάπτυξης και παραγωγής, μάρανση φύλλων και απώλεια χρωστικών όπως η χλωροφύλλη (Leinonen κ.α., 2006; Jones και Schofield, 2008). Οι βασικές περιοχές ενδιαφέροντος όσο αφορά την αναζήτηση φασματικών υπογραφών (Πίνακας 2) που σχετίζονται με καταπονήσεις οριοθετήθηκαν από τη δεκαετία του '70 από ερευνητές που βασίστηκαν στην μελέτη των φυσιολογικών λειτουργιών των φυτών (Knippling, 1970) και συνεχίζουν να αξιολογούνται έως σήμερα (Sellers, 1985; Jones και Schofield, 2008). Από τη δεκαετία του '90 η ανάγκη για γρήγορα αντιληπτές αποκρίσεις στην υδατική καταπόνηση που να αφορούν ολόκληρες καλλιέργειες έστρεψε το ενδιαφέρον των ερευνητών στα φορητά πολυφασματικά ραδιόμετρα με μεγάλη φασματική ανάλυση (Gamon κ.α., 1992; Penuelas κ.α. 1993). Τα όργανα αυτά προσέφεραν νέες δυνατότητες εξέτασης των δυναμικών φυσιολογικών διαδικασιών που συμβαίνουν σε ικανοποιητικές χρονικές και χωρικές κλίμακες.

Σήμερα είναι γενικά αποδεκτό ότι κάθε ξεχωριστός φασματικός αισθητήρας παρέχει περιορισμένη πληροφορία μια και καταγράφει αλλαγές που σχετίζονται με λίγες αντιδράσεις του φυτού, οι οποίες από την άλλη πλευρά μπορεί να σχετίζονται με διαφόρων ειδών παράγοντες καταπόνησης (Jones και Schofield, 2008). Για το λόγο αυτό ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων αισθητήρων καταγραφής ακτινοβολίας έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να οδηγήσει στο ζητούμενο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα η θερμική απεικόνιση εκφράζει κυρίως τις αλλαγές στο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής που συνήθως προκαλείται από αλλαγές στο άνοιγμα των στοματίων, αλλά από την άλλη οι αλλαγές στο άνοιγμα των στοματίων μπορεί εκτός από υδατική καταπόνηση να προκαλούνται και από άλλες αιτίες όπως προσβολές από μύκητες ή μεγάλες συγκεντρώσεις αλάτων κοκ. Επιπλέον πληροφορία ώστε να εντοπιστεί το πραγματικό αίτιο θα μπορούσε να βρεθεί από ένα αισθητήρα ανάκλασης. Παραδείγματα τέτοιων συνδυασμών έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια. Οι Leinonen και Jones (2004) συνδύασαν θερμικούς αισθητήρες με μετρητές ανάκλασης, οι Lenk κ.α. (2007) συνδύασαν μετρητές ανάκλασης στο ορατό και αισθητήρες εκπομπής (fluorescence), οι Chaerle κ.α., (2007) χρησιμοποίησαν πληροφορία από αισθητήρες θερμότητας, ανάκλασης και εκπομπής ενώ ήδη αξιολογείται η δυνατότητα αυτοματοποίησης καταγραφής θερμικών εικόνων και μετρήσεων ανάκλασης στο ορατό (ή στο ερυθρό / υπέρυθρο) για την διαχείριση συστημάτων άρδευσης (Leinonen και Jones, 2004; Jones και Schofield, 2008)

αξιολογούν). Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες συνδυασμού διαφορετικών τεχνολογιών καταγραφής ακτινοβολίας για τη διάγνωση και ποσοτικοποίηση καταπονήσεων των φυτών.

Πίνακας 2 Σύνοψη των βασικότερων πιθανών χρήσεων πολύ-φασματικής καταγραφής για εκτίμηση υδατικής καταπόνησης (Jones και Schofield, 2008).

Θερμογραφία (Thermography)	Ανάκλαση (Reflectance)	Εκπομπή (Fluorescence)
Υδατική καταπόνηση (Water stress)		
Αύξηση θερμοκρασίας (πρωταρχική απόκριση κυρίως σε ισουδρικά (isohydric) φυτά ^(α))	Αλλαγές στην κατανομή της γωνίας κλίσης των φύλλων που μπορεί να γίνει αντιληπτή με καταγραφή από πολλές διαφορετικές γωνίες (multiangular sensing) ^(β) Μεταβολή της ανάκλασης (μείωση ή αύξηση ανάλογα με το είδος του φυτού) ^(γ)	Αύξηση της εκπομπής στο μπλε και το πράσινο, μείωση της χλωροφύλλης F (Chl-F) ^(δ) ή της φωτοχημικής παραγωγής ^(ε)

^(α)Jones, 2004; ^(β)Casa και Jones, 2004; ^(γ)Carter, 1993; ^(δ)Lichtenhaler και Miehe, 1997; ^(ε)Mayer και Genty, 1999

Σύμφωνα με πολλές ενδείξεις (Schroeder, 2002; Sarlikioti, κ.α., 2011), μία εφαρμογή δεδομένων ανάκλασης με μεγάλες πιθανότητες επιτυχίας είναι η χρήση τους για ανάπτυξη δεικτών εκτίμησης της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας με σκοπό την ενταξή της σε μοντέλα εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας. Αυτό σχετίζεται με την υδατική καταπόνηση, αφού από καιρό έχει αποδειχθεί σε εργασίες συσχέτισης φυτικών λειτουργιών και διαθεσιμότητας νερού ότι η αύξηση των φύλλων σε μέγεθος αποτελεί την πιο ευαίσθητη από τις λειτουργίες των φυτών στην υδατική καταπόνηση ενώ η στοματική αγωγιμότητα και η επιτάχυνση της μάρανσης είναι σχετικά πολύ λιγότερο ευαίσθητες (Boyer, 1970; Hsiao, 1973; Bradford και Hsiao, 1982; Sadras και Milroy, 1996).

Μετρήσεις παραμέτρων υποστρώματος (θ , EC)

Η υγρασία στα υποστρώματα υδροπονίας

Τα υποστρώματα υδροπονίας (πορώδη σώματα) συγκρατούν υγρασία λόγω ελκτικών δυνάμεων μεταξύ της επιφάνειας της στερεάς ουσίας τους και του νερού (δυνάμεις συνάφειας). Η μύζηση υποστρώματος (ψ) ισούται με το μέτρο των δυνάμεων συνάφειας ανά μονάδα επιφάνειας στερεών τεμαχιδίων (εκφράζεται συνήθως σε kPa, bar, cm, pF^{14} , κοκ).

Σε κάθε επίπεδο μύζησης αντιστοιχεί και μία ποσότητα υγρασίας που μπορεί να συγκρατηθεί από το υπόστρωμα. Η περιεκτικότητα κατά όγκο σε υγρασία (θ , % v/v) ορίζεται ως η εκατοστιαία αναλογία μεταξύ του όγκου του νερού που περιέχεται σε ένα υπόστρωμα (V_w) και του συνολικού όγκου του υποστρώματος (V_s):

$$\theta \equiv \frac{V_w}{V_s} 100\%$$

Εξίσωση 12 Περιεκτικότητα κατ' όγκο σε υγρασία

Το διάγραμμα όπου παρουσιάζονται τα ζεύγη τιμών μύζησης-υγρασίας ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας (X.K.Y., moisture characteristic curve, pF -curve). Τα φυτά πρέπει να υπερνικήσουν τη μύζηση υποστρώματος ώστε να μπορέσουν να αποσπάσουν νερό από αυτό και να το χρησιμοποιήσουν για τις φυσιολογικές τους λειτουργίες. Υπάρχουν κάποια επίπεδα υγρασίας του υποστρώματος που έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων (Savvas, 2009)¹⁵:

- Υδατοϊκανότητα φυτοδοχείου (θ_{cc} , container capacity), η οποία ισούται με την μέγιστη περιεκτικότητα (%) ενός υποστρώματος σε υγρασία σε συνθήκες ανεμπόδιστης στράγγισης. Συμβατικά η θ_{cc} λαμβάνεται ίση με την περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία (με βάση την X.K.Y.) σε μύζηση 10 cm στήλης νερού (1 kPa). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τον πετροβάμβακα και τον περλίτη η θ_{cc} είναι στα επίπεδα του 51% και του 33% αντίστοιχα.
- Εύκολα διαθέσιμο νερό (ΕΔΝ, Easily Available Water- EAW) καλείται η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας ενός υποστρώματος σε υγρασία στα 10 και 50 cm στήλης νερού (1 και 5 kPa, αντίστοιχα). Το νερό αυτό μπορεί να

¹⁴ 1kPa = 0.01 bar = 10cm στήλης νερού, $\text{pF} = \log^{10}(-P)$ με P σε cm

¹⁵ Οι τιμές αυτές έχουν οριστεί ως επίπεδα αναφοράς για τα υποστρώματα υδροπονίας και σε καμία περίπτωση δεν ισχύουν ακριβώς για κάθε ξεχωριστό υπόστρωμα υδροπονίας. Πολύ περισσότερο δεν έχουν εφαρμογή σε κοινά εδάφη.

αντληθεί από τα φυτά χωρίς να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τον πετροβάμβακα και τον περλίτη το ΕΔΝ είναι στα επίπεδα του 46% (51%-5%) και του 7% (33%-26%) αντίστοιχα.

- Ρυθμιστική περιεκτικότητα νερού (ΡΠΝ, Water Buffering Capacity - WBC). Η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας ενός υποστρώματος σε υγρασία σε 50 και σε 100 cm στήλης νερού (5 και 10 kPa, αντίστοιχα). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τον πετροβάμβακα και τον περλίτη το ΡΠΝ είναι στα επίπεδα του 2-3%.

Για μεγαλύτερες τιμές μύζησης, το νερό είναι από δύσκολα έως καθόλου διαθέσιμο για τα φυτά (στα 15.000 cm ή 1500 kPa αντιστοιχεί το σημείο μόνιμης μάρανσης, πέρα από το οποίο τα φυτά έχουν μηδενική δυνατότητα άντλησης νερού).

Σύμφωνα με τον Ravin κ.α., (2002), τα υποστρώματα υδροπονίας έχουν πολύ μικρότερες δυνατότητες άσκησης δυνάμεων πλέγματος (matric forces) για συγκράτηση νερού σε σχέση με το έδαφος. Έτσι τα φυτά που αναπτύσσονται σε τέτοια πορώδη μέσα, σε κατάσταση υδατοικανότητας φυτοδοχείου (container capacity) ή κοντά σε αυτή δαπανούν πολύ λιγότερη ενέργεια για να πάρουν νερό από το υπόστρωμα σε σχέση με παρόμοιες συνθήκες στο έδαφος. Κάθε χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας μπορεί να κατασκευαστεί πειραματικά και να μοντελοποιηθεί (σχέση μεταξύ h (cm, kPa κοκ) και θ (% , v/v). Ένα γενικά αποδεκτό μοντέλο στο οποίο προσαρμόζονται τέτοια δεδομένα είναι το ακόλουθο (μοντέλο van Genuchten από: Savvas, 2009):

$$Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$$

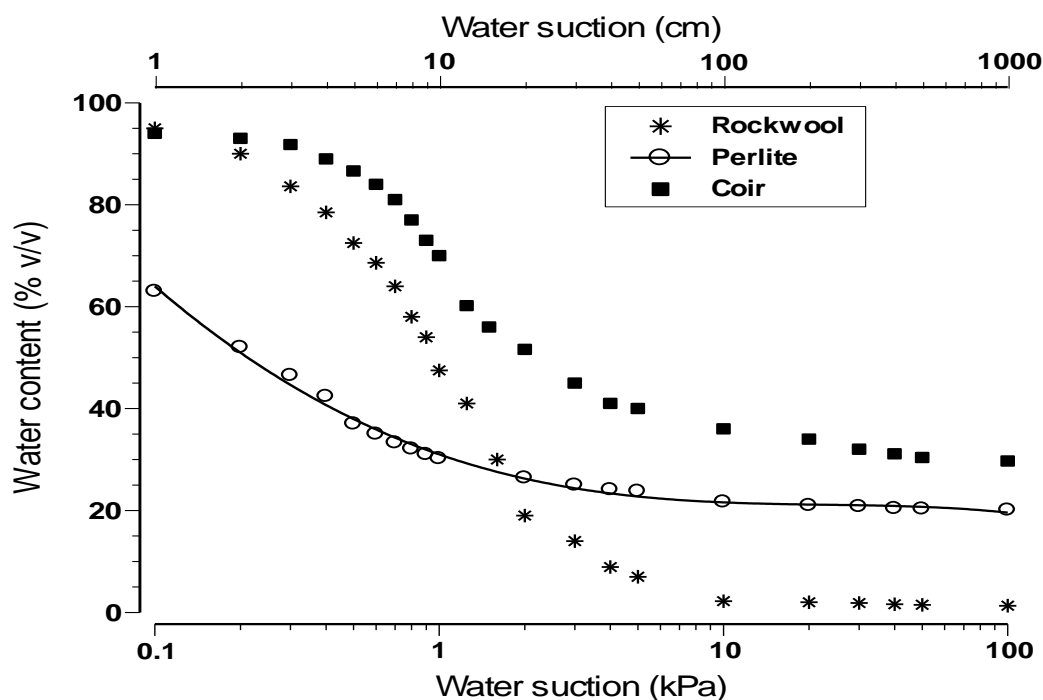
Εξίσωση 13 Μοντέλο Van Genuchten

$$Se = \left[1 + (a \cdot h)^n \right]^{(1/n)-1}$$

Το σύστημα αυτό μπορεί να λυθεί ως προς θ (% , v/v) και έτσι να προκύψει μία σχέση $\theta=f(h)$, που δίνει την περιεχόμενη υγρασία (θ) ως συνάρτηση της μύζησης (h σε cm). Ζεύγη τιμών Se (effective saturation) και h προκύπτουν από μετρήσεις με συσκευές όπως το Sandbox (Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands)¹⁶. Από τις μετρήσεις

¹⁶ Το Sandbox είναι μία μηχανική συσκευή μέτρησης της Χ.Κ.Υ. (pF determination, συνήθως για τιμές pF 0 έως 2 δηλαδή για μύζηση από 0 έως 10kPa). Αδιατάραχτα δείγματα εδάφους (κύλινδροι ύψους 5cm και όγκου 100cm³) τοποθετούνται σε ομοιογενή επιφάνεια άμμου που έχει κορεστεί με νερό. Μύζηση (h), π.χ. 0, 10, 50, 40, 80, 100 cm στήλης νερού, επιβάλλεται βηματικά κατεβάζοντας την ελεύθερη στάθμη νερού ενός συγκοινωνούντος δοχείου -που κινείται πάνω σε μία στήλη μέτρησης- σε αντίστοιχη απόσταση από τη μέση των δειγμάτων. Αφού αφεθούν για κάποιο χρόνο να ισορροπήσουν όσο αφορά την πίεση τα δείγματα

αυτές μπορούν -με ανάλυση μη-γραμμικής παλινδρόμησης- να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων α και n (παραμέτροι που εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος). Το θ_s (saturated moisture) μετράται πειραματικά (π.χ. με το Sandbox) ενώ το θ_r (residual moisture) εκτιμάται (ως η υγρασία που αντιστοιχεί στο $d\theta/dh=0$, εκεί δηλαδή που η πρώτη μερική παράγωγος της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας ως προς h μηδενίζεται).



Εικόνα 22 Χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας (έως το όριο της ρυθμιστικής ικανότητας νερού) ορισμένων τυπικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε καλλιέργειες εκτός εδάφους - με λογαριθμική κλίμακα στη μύζηση (Milks κ.α. (1989α, β και γ) από Savvas, 2009)¹⁷

ζυγίζονται και από την απώλεια βάρους από βήμα σε βήμα (διαφορά βάρους) υπολογίζεται τελικά το περιεχόμενο (θ , %v/v) σε νερό και επομένως τα ζεύγη θ , h . Με τη διαδικασία αυτή κατασκευάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη κατανάλωσης (drying curve) που είναι και αυτή που μας ενδιαφέρει αφού εξετάζουμε το πώς στεγνώνει το έδαφος μεταξύ αρδεύσεων (η χαρακτηριστική καμπύλη ύγρανσης (wetting curve) θα είναι διαφορετική λόγω του φαινομένου της υστέρησης - η υγρασία υποστρώματος για μία δεδομένη μύζηση για υπόστρωμα που διαβρέχεται είναι μικρότερη από αυτή για το ίδιο υπόστρωμα υπό στράγγιση - κατανάλωση).

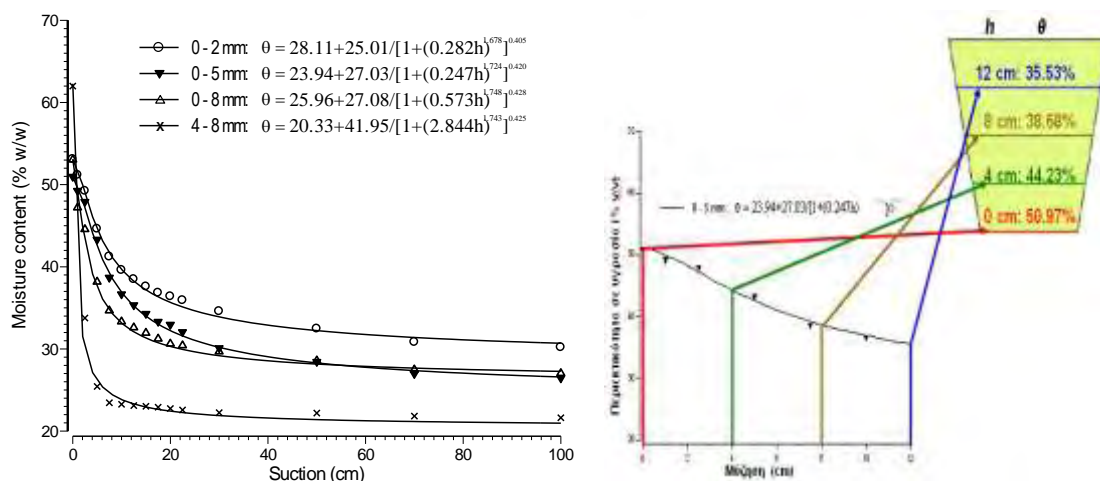
¹⁷ Οι καμπύλες αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως γενικές μια και βασίζονται σε γενικά βιβλιογραφικά δεδομένα και αφορούν υποστρώματα που κατασκευάζονται από διάφορους κατασκευαστές με πρώτες ύλες από διάφορες περιοχές του κόσμου.

Μεταβολή της διαθέσιμης υγρασίας σε σχέση με το ύψος υποστρώματος

Οι παραγωγοί πρέπει να επιλέγουν τον κατάλληλο συνδυασμό μέσου και δοχείου ώστε πέρα από το να ταιριάζει το μέγεθος του φυτοδοχείου στο μοτίβο ανάπτυξης των ριζών (Biran και Eliassaf, 1980) να είναι και εύκολα διαθέσιμες οι απαραίτητες ποσότητες νερού και αέρα στα φυτά στα διάφορα στάδια ανάπτυξής τους. Οι Bilderback και Fonteno (1987) εξέτασαν διάφορα υποστρώματα και κατέληξαν στο ότι το ίδιο μέσο σε διάφορα μεγέθη φυτοδοχείου μπορεί να δημιουργεί διαφορετικά περιεχόμενα νερού και αέρα που διατίθενται στα φυτά. Σε κατάσταση υδατοικανότητας φυτοδοχείου (ισορροπία μετά από άρδευση με επαρκή ποσότητα νερού και ελεύθερη στράγγιση) το περιεχόμενο σε νερό στο κάτω μέρος του φυτοδοχείου βρίσκεται στα επίπεδα του κορεσμού και σταδιακά μειώνεται προς την κορυφή του φυτοδοχείου (Raviv κ.α., 2002; Gizas και Savvas, 2007). Σύμφωνα με τους Bilderback και Fonteno (1987) για την εφαρμογή της φυσικής του εδάφους στην περίπτωση υποστρωμάτων υδροπονίας σε φυτοδοχεία, πρέπει να ληφθούν υπόψη τρία αξιώματα:

1. Η βάση του φυτοδοχείου δρα με τρόπο παρόμοιο με αυτό ενός αδιαπέραστου εδαφικού ορίζοντα (Hillel, 1980). Έτσι μετά από την στράγγιση της ποσότητας νερού που δεν μπορεί να συγκρατηθεί από το υπόστρωμα στην βάση του φυτοδοχείου θα διαμορφωθεί ένας υδάτινος ορίζοντας. Η τάση πλέγματος (matrix tension) στο επίπεδο αυτό θα είναι ουσιαστικά 0 (ελεύθερη επιφάνεια νερού). Από τη στιγμή που θα επιτευχθεί ισορροπία (το υπόστρωμα έχει συγκρατήσει όσο νερό μπορεί μετά από επαρκή άρδευση και ελεύθερη στράγγιση), η τάση συγκράτησης νερού (μύζηση σε cm) σε κάθε σημείο (ύψος) στο φυτοδοχείο θα ισούται με την υδροστατική πίεση που αναπτύσσεται λόγω της διαφοράς ύψους (σε cm) από τη βάση του φυτοδοχείου (ουσιαστικά με το βάρος της υδάτινης στήλης ανά μονάδα επιφάνειας).
2. Από τη Χ.Κ.Υ. μπορεί να βρεθεί η θ (% v/v) σε διάφορα ύψη. Το τμήμα της Χ.Κ.Υ. που αντιστοιχεί από 0 έως κάποιο συγκεκριμένο ύψος μέσα στο φυτοδοχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό (μετά από ολοκλήρωση και διαίρεση με το ύψος αυτό) της ποσοστιαίας υγρασίας στο φυτοδοχείο έως το ύψος που εξετάζεται (Milks, 1986).
3. Ένα εύρος τάσεων πλέγματος υπάρχει στην κατάσταση ισορροπίας. Από 0 στη βάση έως την τιμή που αντιστοιχεί στην πάνω επιφάνεια του υποστρώματος. Από τη στιγμή που η κλίση της Χ.Κ.Υ. αλλάζει έντονα, η

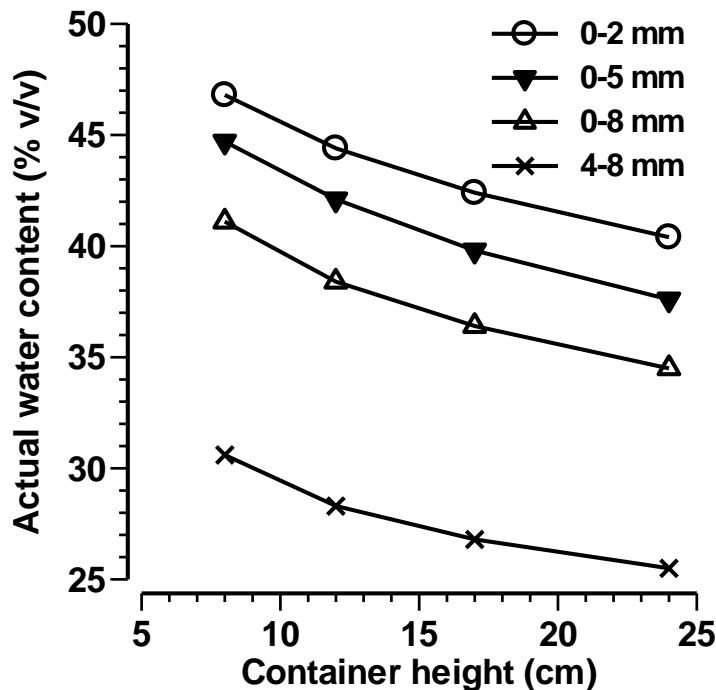
εκτίμηση της θ (% v/v) πρέπει να γίνεται σε πολύ μικρά τμήματα τάσης (ύψους). Οι Bilderback και Fonteno (1987) προτείνουν τη χρήση ζωνών όχι μεγαλύτερων (ψηλότερων) από 2cm.



Εικόνα 23 Αριστερά, Χ.Κ.Υ. (μετρήσεις και μαθηματικό μοντέλο) τεσσάρων τύπων ελαφρόπετρας που διαφέρουν στο μέγεθος των κόκκων (Gizas και Savvas, 2007). Δεξιά, Η περιεκτικότητα ενός υποστρώματος σε υγρασία μεταβάλλεται (ελαττώνεται) καθώς αυξάνει το ύψος του (Savvas, 2009). Οι τιμές που παρουσιάζονται υπολογίζονται με εφαρμογή του μοντέλου της Χ.Κ.Υ με h ίσο με το ύψος από τη βάση του υποστρώματος

Από την στιγμή που έχει αποκατασταθεί ισορροπία με την ολοκλήρωση της στράγγισης, η μύζηση σε κάθε σημείο εντός του δοχείου θα ισούται με την υδροστατική πίεση που ασκείται λόγω της διαφοράς ύψους της συγκεκριμένης θέσης από τη βάση του δοχείου (δυναμικό βαρύτητας, υδροστατική πίεση-μύζηση, επίπεδο αναφοράς). Υπό τέτοιες συνθήκες η κατανομή της υγρασίας κατά μήκος του ύψους του δοχείου είναι η Χ.Κ.Υ. του συγκεκριμένου μέσου. Επομένως η τελική περιεκτικότητα ενός υποστρώματος σε υγρασία μεταβάλλεται καθώς αυξάνει το ύψος του και συνεπώς εξαρτάται από αυτό (Εικόνα 23)¹⁸.

¹⁸ Με πιο απλά λόγια, σε κάποιο υπόστρωμα, σε ύψος 7cm από τη βάση του φυτοδοχείου έχουμε μία στήλη νερού ύψους 7cm η οποία «θέλει να φύγει προς τα κάτω» λόγω βαρύτητας και «για να συγκρατηθεί στη θέση της» κάτι πρέπει να ασκήσει πάνω της μύζηση 7cm. Αυτό το κάτι είναι το υπόστρωμα. Αλλά ασκώντας μύζηση 7cm, το υπόστρωμα μπορεί να κρατήσει μία ορισμένη ποσότητα νερού (όση αντιστοιχεί στα 7cm στην Χ.Κ.Υ.). Αντίστοιχα στο επίπεδο 0 χωρίς να ασκείται καθόλου δύναμη από το υπόστρωμα, αυτό βρίσκεται ουσιαστικά στα επίπεδα του κορεσμού. Επομένως το υπόστρωμα μπορεί να ασκήσει από 0 έως πάρα πολύ μεγάλη μύζηση αλλά συγκρατώντας όλο και λιγότερη υγρασία. Σε κατάσταση υδατοικανότητας (ουσιαστικά ισορροπία μετά από επαρκή άρδευση και ελεύθερη στράγγιση –



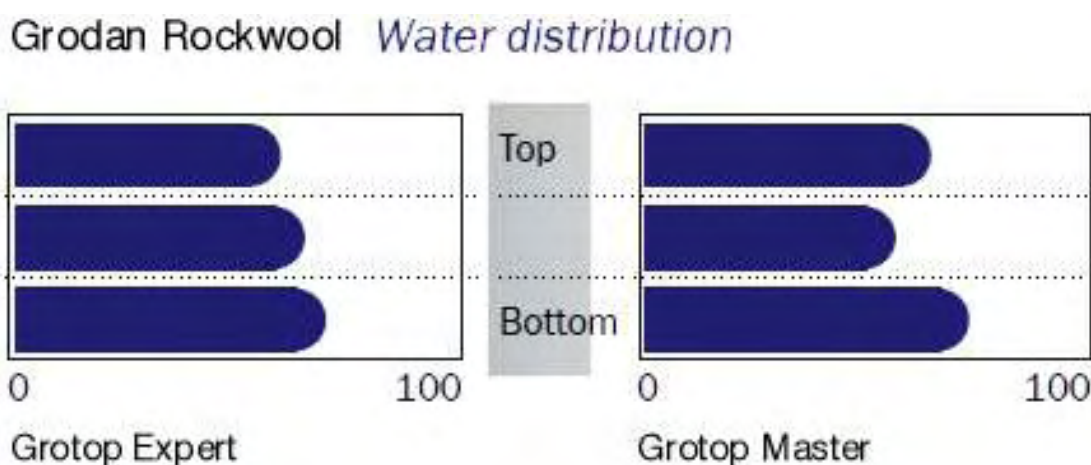
Εικόνα 24 Μεταβολές στην υδατοχωρητικότητα της ελαφρόπετρας σε συνάρτηση με το ύψος της στο φυτοδοχείο (ολοκλήρωση για φυτοδοχεία με ίδιο εμβαδόν εγκάρσιας τομής σε όλο το ύψος τους) (Savvas, 2009)

Για να υπολογιστεί η μέση περιεκτικότητα σε νερό (υγρασία) που αντιστοιχεί σε κάθε ύψος μέσα στο υπόστρωμα (όπως αυτό είναι τοποθετημένο σε «δοχείο» π.χ. σε σάκους ή γλάστρες ή σε κανάλια στο θερμοκήπιο υδροπονίας), ολοκληρώνεται η σχέση $\theta=f(h)$ από 0 έως το ύψος δοχείου (υποστρώματος) που εξετάζεται και διαιρείται με το ύψος αυτό (cm) (Gizas και Savvas, 2007) (π.χ. 0-5cm, 0-10cm, 0-20cm κοκ) (επομένως ισχύει για φυτοδοχεία με ίδιο εμβαδόν εγκάρσιας τομής σε όλο το ύψος τους)¹⁹.

η ουσία της κατάστασης πέρα από τη γενική σύμβαση ότι στα υποστρώματα υδροπονίας υδατοικανότητα είναι η υγρασία που αντιστοιχεί σε μύζηση 10cm στήλης νερού-) και έχοντας μία ελεύθερη επιφάνεια νερού στη βάση του, η «ισορροπία» επιβάλλει τη συγκράτηση σε κάθε ύψος υποστρώματος, τόσο νερού όσο προβλέπεται από το αντίστοιχο ύψος μύζησης στην Χ.Κ.Υ..

¹⁹ Να σημειωθεί εδώ ότι στην εργασία των Bilderback και Fonteno (1987) εξετάζεται η επίδραση της γεωμετρίας γενικά και όχι μόνο του ύψους, δηλαδή αξιολογούνται διάφορες διαμορφώσεις δοχείου π.χ. κωνικές (κόλινδρους), αντιστροφους κώνικες κοκ, αντίθετα με την εργασία των Gizas και Savvas (2007) όπου υπολογίζεται η περιεκτικότητα σε νερό με το ύψος ανά μονάδα επιφάνειας δοχείου για δοχεία με ίδια διατομή καθ' ύψος.

Μια σειρά από εργασίες βασίστηκε σε αυτή την παρατήρηση, επιβεβαιώνοντας την σχέση υγρασίας και ύψους φυτοδοχείου (Raviv κ.α., 2002; Bougoul κ.α., 2005; Gizas και Savvas, 2007; Owen και Altland, 2008; Savvas, 2009; Al Naddaf κ.α., 2011). Στις εργασίες αυτές παρατίθενται χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας, μελετήθηκε η διαθεσιμότητα υγρασίας σε σχέση με το ύψος φυτοδοχείου και αναφέρονται πρακτικές επεκτάσεις και προβλήματα που μπορούν να προκληθούν από το φαινόμενο αυτό. Οι εταιρείες παραγωγής υποστρωμάτων αξιοποιούν ήδη αυτή την γνώση αναπτύσσοντας διαστρωμένα υποστρώματα (επομένως έχει σημασία η πλευρά τοποθέτησης) με σκοπό την διατήρηση υγρασίας στα αποδεκτά από την υδροπονία επίπεδα και στα ανώτερα στρώματα τους υποστρώματος (Εικόνα 25).



Εικόνα 25 Υγρασία σε υποστρώματα πετροβάμβακα²⁰ (www.grodan.com)

Μύζηση και υδραυλική αγωγιμότητα

Όπως αναφέρθηκε ήδη, στην πράξη οι μετρήσεις υγρασίας υποστρώματος γίνονται στο πλαίσιο του στόχου για διατήρηση της υγρασίας υποστρώματος εντός των ορίων του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού (ΕΔΝ). Βέβαια στην εποχή μας η προσέγγιση αυτή δέχεται επικρίσεις. Σύμφωνα με τους Raviv κ.α., (2002) αυτό που ενδιαφέρει στην ουσία είναι η πραγματική δυνατότητα των ριζών να μυζήσουν νερό από το έδαφος χωρίς να χρειάζεται να δαπανήσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας αλλά και η δυνατότητα του υποστρώματος να αναπληρώσει τα επίπεδα υγρασίας γύρω από τις ρίζες. Η μύζηση από τις ρίζες εξαρτάται από τη στιγμιαία κατάσταση των ατμοσφαιρικών συνθηκών (καθορίζουν την εξατμισοδιαπνοή) και την διαθεσιμότητα

²⁰ Ο γενικός αγγλικός όρος για τον πετροβάμβακα είναι rockwool, η Grodan χρησιμοποιεί τον όρο stonewooll ώστε να χαρακτηρίσει το είδος πετροβάμβακα που παράγει.

νερού στο υπόστρωμα, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την αντίσταση που συναντά το νερό κατά τη μετακίνησή του από την κύρια μάζα του υποστρώματος στην περιοχή διεπαφής υποστρώματος – ριζών και μέσω των ιστών της ρίζας στο ξυλέγχυμα αυτής. Η μείωση της υγρασίας σε μία περιοχή του υποστρώματος προκαλεί κίνηση νερού από τον όγκο που το περιβάλλει ώστε να υπάρξει αναπλήρωσή του. Η ροή αυτή εξαρτάται από τη στιγμιαία τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας (hydraulic conductivity) στον όγκο του υποστρώματος που περιβάλλει τις ρίζες και την κλίση υδραυλικού φορτίου (hydraulic head gradient) μεταξύ του όγκου αυτού του υποστρώματος και της επιφάνειας της ρίζας:

$$q = -K(\psi) \frac{d\psi}{ds}$$

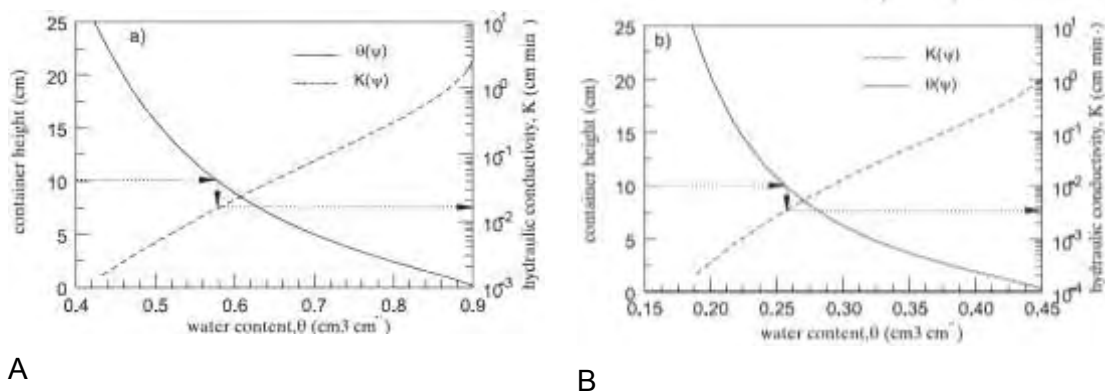
Εξίσωση 14 Ροή νερού σε πορώδες μέσο

21

όπου το q (L/T) είναι η ροή νερού μέσω της περιοχής διεπαφής ρίζας – υποστρώματος, $K(\psi)$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε μη-κορεσμένη κατάσταση, η οποία εξαρτάται μη-γραμμικά από την μύζηση ψ ή το περιεχόμενο σε υγρασία θ και s είναι η διάσταση ενός άξονα που δείχνει σε κάθε διεύθυνση κατά την προσέγγιση του νερού προς την περιοχή διεπαφής ρίζας – υποστρώματος. Λόγω της μη-γραμμικότητας της σχέσης μεταξύ υδραυλικής αγωγιμότητας και περιεχομένου σε υγρασία $K(\theta)$ μία διαφορά από μία ορισμένη τιμή του θ προκαλεί μία μέτρια μείωση στην K , ενώ μία παρόμοια διαφορά από μία μικρότερη τιμή του θ προκαλεί έντονη μείωση της K .

Η στιγμιαία ισορροπία μεταξύ της πραγματικής ροής νερού από τον όγκο του υποστρώματος που περιβάλλει τις ρίζες και η δυνητική ένταση απόσπασης (που εξαρτάται κυρίως από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες) καθορίζει εάν η υγρασία του υποστρώματος είναι τελικά πλήρως διαθέσιμη στα φυτά. Με την έκφραση «πλήρως διαθέσιμη» οι Ravin κ.α. (2002) εννοούν ότι το νερό που αποσπάται από την περιοχή που γειτνιάζει με τις ρίζες μπορεί να αναπληρωθεί με έναν ρυθμό αντίστοιχο της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Εάν αυτό δεν μπορεί να συμβεί τότε η τροφοδοσία των ριζών με νερό θα περιοριστεί λόγω της μειωμένης δυνατότητας μετακίνησης νερού προς την περιοχή των ριζών ή με άλλα λόγια από την αγωγιμότητα του υποστρώματος στην ριζόσφαιρα και γύρω από αυτή.

²¹ Η εξίσωση αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η βαρύτητα έχει αμελητέα επίδραση στην ροή νερού από το υπόστρωμα προς τη ρίζα κοντά στην περιοχή διεπαφής υποστρώματος ρίζας.



Εικόνα 26 Χ.Κ.Υ. και καμπύλες υδραυλικής αγωγιμότητας για δύο υποστρώματα οδροπονίας (Raviv κ.α., 2002)

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζονται οι Χ.Κ.Υ. δύο υποστρωμάτων σε κατάσταση υδατοικανότητας φυτοδοχείου (ισορροπία μετά άρδευση με επαρκή ποσότητα νερού και ελεύθερη στράγγιση). Στα διαγράμματα έχουν προστεθεί και οι χαρακτηριστικές καμπύλες υδραυλικής αγωγιμότητας ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα σε κάθε ύψος στο φυτοδοχείο. Τα δύο υποστρώματα έχουν διαφορετικές καμπύλες υγρασίας (το Α έχει μεγαλύτερη δυνατότητα συγκράτησης νερού), αλλά και τα δύο χαρακτηρίζονται από μεγάλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό (K_s). Όμως καθώς η μύζηση (εκφράζεται στα διαγράμματα ως ύψος από τη βάση του φυτοδοχείου) αυξάνει από 0 στα 25cm και το περιεχόμενο σε νερό μειώνεται αντίστοιχα, η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται κατά τρία δεκαδικά ψηφία για το υπόστρωμα Α και κατά τέσσερα για το Β. Στα 10cm η θ είναι 0,6 για το Α και 0,19 για το Β. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι αντίστοιχα $1,5 \cdot 10^{-2}$ και $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm min}^{-1}$. Οι μικρότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στο πάνω μέρος του φυτοδοχείου δείχνουν ότι το νερό είναι ελάχιστα διαθέσιμο εκεί παρά το ότι το νερό ακόμη και σε εκείνα τα ύψη είναι εντός των ορίων του εύκολα διαθέσιμου νερού²². Μέθοδος που να εκτιμά την διαθεσιμότητα νερού μέσω άμεσης μέτρησης των θ και $K(\theta)$ στην περιοχή των ριζών δεν υπάρχει (Raviv κ.α., 2002).

²² Η περιοχή του Εύκολα διαθέσιμου νερού έχει οριστεί συμβατικά ως η διαφορά μεταξύ της περιεκτικότητας ενός υποστρώματος σε υγρασία στα 10 και 50 cm στήλης νερού (1 και 5 kPa, αντίστοιχα).

Χρήση αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος στο πλαίσιο της διαχείρισης άρδευσης σε υδροπονικές καλλιέργειες

Σύμφωνα με τον Schroeder (2002) η καλύτερη προσέγγιση για τον αυτόματο έλεγχο της άρδευσης είναι η χρήση μετρήσεων των κατάλληλων παραμέτρων του υποστρώματος (εδάφους ή άλλου). Ο Stadiot (2001) αναφέρει ότι διατηρώντας διαφορές μεταξύ υγρασίας νύκτας και ημέρας είναι δυνατό να οδηγηθούν τα φυτά σε παραγωγική ή/και αυξητική ανάπτυξη. Σε πρακτικό επίπεδο η προσπάθεια στο πλαίσιο ενός αποτελεσματικού προγράμματος άρδευσης συνεχίζει να αποσκοπεί στο να διατηρείται η περιεκτικότητα σε υγρασία εντός των ορίων του εύκολα διαθέσιμου νερού (ΕΔΝ). Σε αυτό το πλαίσιο ανά διαστήματα (συχνότητα άρδευσης, που δεν είναι σταθερή στη διάρκεια της ημέρας και εξαρτάται από το ρυθμό ζήτησης νερού από τα φυτά) παρέχεται ποσότητα νερού (δόση άρδευσης, σταθερή που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος²³) ώστε να μένει η υγρασία στο υπόστρωμα εντός των ζητούμενων ορίων και να μπορούν τα φυτά να καλύπτουν τις ανάγκες τους σε νερό (εξατμισοδιαπνοή – ET). Απόλυτη εξίσωση ET και ποσότητας νερού άρδευσης δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη κυρίως λόγω της αυξανόμενης αλατότητας στην ριζόσφαιρα. Τα φυτά δεν προσλαμβάνουν ορισμένα μη-απαραίτητα ιόντα και έτσι σιγά-σιγά αναπτύσσεται αλατότητα. Για να αποφευχθεί αυτό, περίσσεια ποσότητα νερού πρέπει να παρέχεται μέσω της άρδευσης ώστε να γίνεται απόπλυση των αλάτων που συσσωρεύονται. Με τον τρόπο αυτό και οι ρίζες δεν εκτίθενται σε υπερβολικά χαμηλό ωσμωτικό δυναμικό και το Ψ_{soil} του διαλύματος εντός του υποστρώματος είναι κοντά σε αυτό του θρεπτικού διαλύματος (νερού υπό τη γενική έννοια) άρδευσης (Raviv κ.α., 2002).

Οι περισσότεροι αισθητήρες μέτρησης της υγρασίας σχετίζουν κάποιο ηλεκτρικό, φυσικό ή χημικό φαινόμενο με την ποσότητα νερού στο υπόστρωμα. Η πιο απλή εκδοχή τέτοιων αισθητήρων περιλαμβάνει ένα πορώδες σώμα στο οποίο είναι ενσωματωμένα δύο ηλεκτρόδια (electrical conductance sensors). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων σχετίζεται με τα επίπεδα υγρασίας, αλλά δυστυχώς και με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του νερού. Για το λόγο αυτό οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν προβλήματα εφαρμογής σε καλλιέργειες εκτός εδάφους (π.χ. σε συστήματα υδροπονίας). Παρόμοιο πρόβλημα -αλλά σε πολύ

²³ Αλλά και από τις δυνατότητες του συστήματος παρασκευής διαλύματος. Π.χ. ένα σύστημα –όπως είναι η τυπική περίπτωση- που παρασκευάζει διάλυμα την ώρα της ζήτησης απαιτεί κάποιο ελάχιστο χρόνο (διάρκεια άρδευσης) ώστε το διάλυμα να σταθεροποιηθεί εντός των προδιαγραφών της συνταγής. Αυτό το πρόβλημα δεν υπάρχει σε συστήματα που αποθηκεύουν θρεπτικό διάλυμα σε δεξαμενές από τις οποίες γίνεται η άρδευση.

μικρότερο βαθμό- παρατηρείται και σε άλλες τεχνολογίες μέτρησης της εδαφικής υγρασίας όπως π.χ. αισθητήρες μέτρησης της ισχύος ανάκλασης στο πεδίο του χρόνου (TDR - time domain reflectometry) και μέτρησης της ισχύος ανάκλασης στο πεδίο των συχνοτήτων (FDR - frequency domain reflectometry). Τα тенσιόμετρα από την άλλη πλευρά δεν επηρεάζονται από την αλατότητα αλλά έχουν υψηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Εάν είναι γνωστή η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας του υποστρώματος μπορεί η ένδειξη του тенσιόμετρου (μύζηση) να μετατραπεί στην αντίστοιχη υγρασία. Συνήθως στα αυτόματα συστήματα ελέγχου άρδευσης συνδέεται ένας τέτοιος αισθητήρας ανά αρδευτική ζώνη (στάση) και για το λόγο αυτό η θέση του πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική για όλη την περιοχή που καλύπτει. Σε πολλές περιπτώσεις τα αυτόματα συστήματα ελέγχου άρδευσης συνδυάζουν αισθητήρες παραμέτρων υποστρώματος με μετρήσεις παραμέτρων του μικροκλίματος ή/και των φυτών στο πλαίσιο πολυπαραμετρικών μοντέλων για τον αυτόματο έλεγχο της άρδευσης.

Σε κάθε περίπτωση το θέμα της ανάπτυξης καλύτερων αισθητήρων για τον έλεγχο της άρδευσης με βάση την υγρασία (ή και άλλες παραμέτρους) του υποστρώματος παραμένει ανοικτό. Σε αυτό το πλαίσιο δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ποτέ ότι όσο πιο πολύπλοκη και απαιτητική σε συντήρηση και γνώσεις είναι μία προσέγγιση τόσο πιο δύσκολο είναι να εφαρμοστεί σε ευρεία κλίμακα στην πράξη.

Παραδείγματα εφαρμογών και αισθητήρων για άρδευση σε καλλιέργειες εκτός εδάφους

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το αυτόματο έλεγχο της άρδευσης. Η πιο ευρεία εφαρμογή αφορά αισθητήρες που άμεσα ή έμμεσα δίνουν πληροφορία σχετικά με τα επίπεδα υγρασίας στο υπόστρωμα. Ο Muñoz-Carpena (2009) αλλά και οι Pardossi κ.α. (2009) σε πρόσφατα άρθρο ανασκόπησης παραθέτουν όλες τις τελευταίες εξελίξεις σχετικά με την χρήση αισθητήρων υγρασίας για εδάφη και υποστρώματα. Στην συνέχεια γίνεται πολύ συνοπτική παρουσίαση των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών που έχουν δυνατότητα αποτελεσματικής εφαρμογής σε παραγωγικές συνθήκες (για παράδειγμα δεν παρουσιάζονται η μέθοδος νετρονίων, αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας, ψυχρόμετρα εδάφους κκ).

Αισθητήρες μέτρησης τάσης - Τενσιόμετρα (Tensiometer)

Η χρήση τενσιομέτρων είναι μία μέθοδος που εφαρμόζεται εδώ και δεκαετίες για τον έλεγχο της άρδευσης σε καλλιέργειες στο χώμα. (Lieth και Oki, 2007; Muñoz-Carpena, 2009; Pardossi κ.α., 2009). Το τενσιόμετρο είναι μία συσκευή που μετρά δυναμικό πλέγματος (matric potential) ή μύζηση υγρασίας (moisture tension). Αποτελείται από ένα σωλήνα με μία πορώδη κεραμική τάπα στο ένα άκρο και ένα μετρητή πίεσης στο άλλο (μπορεί να δίνει και ηλεκτρικό σήμα). Ο σωλήνας γεμίζει με νερό και η συσκευή σφραγίζεται και τοποθετείται στο υπόστρωμα (οριζόντια, κατακόρυφα ή με οποιαδήποτε γωνία) έτσι ώστε η κεραμική τάπα να βρίσκεται στο βάθος που ενδιαφέρει.

Λαμβάνοντας υπόψη και την ομοιομορφία εφαρμογής του συστήματος αλλά και τις αποστάσεις από φυτά και σταλάκτες τα τενσιόμετρα πρέπει να τοποθετούνται σε χαρακτηριστικά για κάθε ζώνη ή στάση άρδευσης σημεία. Τενσιόμετρα με κεραμικές τάπες υψηλής ροής αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές στην υγρασία και έτσι είναι περισσότερο κατάλληλα για υποστρώματα υδροπονίας (Munoz-Carpena κ.α., 2005). Μία κοινή εφαρμογή χρήσης των τενσιομέτρων είναι η χρήση του σήματος για την παρεμπόδιση της άρδευσης εάν δεν πέσει η υγρασία κάτω από ένα ορισμένο σημείο. Μια περισσότερο πολύπλοκη προσέγγιση αφορά δύο σημεία αναφοράς: ένα σημείο υψηλής μύζησης που αντιπροσωπεύει το χαμηλό όριο υγρασίας και ενεργοποιεί την άρδευση και ένα σημείο χαμηλής μύζησης που αντιπροσωπεύει το υψηλό όριο υγρασίας και ορίζει τον τερματισμό της άρδευσης (η τη συνέχισή της για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα επιπλέον ώστε να επιτευχθεί και το ζητούμενο ποσοστό απορροής). Το ζήτημα είναι ότι η ένταση διαβροχής του συστήματος άρδευσης πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή ώστε να μπορεί το τενσιόμετρο να ακολουθεί τις αλλαγές στην υγρασία του υποστρώματος (αυτό μπορεί να επιτευχθεί και εφαρμόζοντας την άρδευση με παλμούς). Τέλος ο έλεγχος με τενσιόμετρα πρέπει να περιλαμβάνει και μία σειρά από ειδοποιήσεις που μπορεί να σχετίζονται με προβλήματα στο σύστημα άρδευσης. Για παράδειγμα σε περίπτωση που παρουσιάζονται πολύ υψηλές τιμές μύζησης.

Γενικές τιμές των ορίων αυτών για υποστρώματα είναι τα 1 και 5kPa. Βέβαια για κάθε υπόστρωμα χρειάζεται αξιολόγηση και αντίστοιχη ρύθμιση των ορίων. Σύμφωνα με τους Lieth και Oki (2007) για ορισμένα υποστρώματα συμπεριλαμβανομένων του πετροβάμβακα και του περλίτη δεν έχει αποδειχθεί κατά πόσο η χρήση των τενσιομέτρων είναι αποτελεσματική. Ο κύριος λόγος για αυτό ίσως σχετίζεται με το μεγάλο πορώδες των υποστρωμάτων αυτών (> 80% σε σχέση με το σχεδόν 50 των

κοινών εδαφών) που έχει ως αποτέλεσμα την μέτρια επαφή μεταξύ υποστρώματος και κεραμικής τάπας (Pardossi κ.α., 2009).

Στα πλεονεκτήματα των τενσιομέτρων συγκαταλέγονται τα ακόλουθα (Muñoz-Carpena, 2009):

- Άμεση μέτρηση της ζητούμενης ιδιότητας (τάση)
- Περιοχή δείγματος σφαιρική με διάμετρο έως και 10cm
- Δεν επηρεάζεται από την αλατότητα του υποστρώματος
- Δυνατότητα συνεχών μετρήσεων με καταγραφή σε datalogger
- Απλή και φθηνή κατασκευή με απλοϊκές ανάγκες συντήρησης

Ως μειονεκτήματα αναφέρονται τα ακόλουθα (Muñoz-Carpena, 2009):

- Μικρό εύρος μέτρησης μύζησης ($< 1\text{ bar}$)
- Σχετικά χαμηλός χρόνος απόκρισης
- Ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση ώστε να γεμίζει με νερό όταν χρειάζεται

Αισθητήρες μέτρησης διηλεκτρικής χωρητικότητας (Dielectric Capacitance)

Οι μέθοδοι υπολογισμού της υγρασίας στα υποστρώματα μέσω μετρήσεων της διηλεκτρικής χωρητικότητας ή περατότητας (dielectric capacitance ή dielectric permittivity) αποκτούν όλο και περισσότερες εφαρμογές στην πράξη επειδή έχουν πολύ γρήγορη απόκριση ενώ μπορούν παράλληλα σε ορισμένες περιπτώσεις να μετρήσουν και την αλατότητα-ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του υποστρώματος (Lieth και Oki, 2007; Muñoz-Carpena, 2009). Η έμμεση αυτή μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση της διηλεκτρικής χωρητικότητας η οποία καθορίζει την ταχύτητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ή παλμού μέσω του εδάφους. Προφανώς όλα τα υλικά που υπάρχουν στο έδαφος επηρεάζουν την διηλεκτρική σταθερά αλλά από τη στιγμή που η τιμή της για το νερό είναι πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα υλικά (81 για το νερό, 2-5 για τα εδαφικά σωματίδια των περισσότερων εδαφών και 1 για τον αέρα), το περιεχόμενο σε νερό ευθύνεται κυρίως για την τελική της τιμή. Όλες οι μέθοδοι μέτρησης διηλεκτρικής χωρητικότητας χρησιμοποιούν εμπειρικά μοντέλα για την εκτίμηση του περιεχομένου σε νερό μέσω της μέτρησης της του σήματος εξόδου. Οι βασικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες (Pardossi κ.α., 2009; Muñoz-Carpena, 2009):

- Μέτρηση της ισχύος ανάκλασης στο πεδίο του χρόνου (Time domain reflectometry - TDR)

- Μέτρηση πεδίου συχνότητας (Frequency domain - FD) με δύο βασικές τεχνικές: χωρητικότητα (Capacitance) και μέτρηση της ισχύος ανάκλασης στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Domain Reflectometry - FDR)
- Μέτρηση εύρους ανάκλασης (Amplitude Domain Reflectometry - ADR)

Σημειώνεται ότι οι αισθητήρες FD και TDR μετρούν με κατάλληλες τροποποιήσεις και τάση πλέγματος (ψ) (Pardossi κ.α., 2009).

Μέτρηση της ισχύος ανάκλασης στο πεδίο του χρόνου (Time domain reflectometry - TDR)

Η τεχνική TDR χρησιμοποιεί παράλληλα μεταλλικά στοιχεία (οδηγούς κύματος) για να μεταφέρει έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπόστρωμα. Ο χρόνος που χρειάζεται οι παλμός ώστε να κινηθεί κατά μήκος των οδηγών κύματος είναι συνάρτηση της διηλεκτρικής χωρητικότητας του εδάφους (Dalton και Poss, 1990). Ακόμη η ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που επιστρέφει μπορεί να δώσει πληροφορίες για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (Lieth και Oki, 2007). Οι μετρητές TDR έχουν συνήθως 2 ή τρεις παράλληλες μεταλλικές αιχμές ή ακίδες με μήκος από 10 έως 50cm, είναι σχετικά φθηνοί και έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα κυρίως λόγω της απλότητας κατασκευής τους. Ορισμένες εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν σπειροειδείς οδηγούς κύματος ώστε να μειωθεί το μήκος των μετρητών (Nissen κ.α., 1998) και ενσωμάτωσή τους σε γύψινα στοιχεία ώστε να μετρούν δυναμικό πλέγματος (Persson κ.α., 2006). Στα πλεονεκτήματα των αισθητήρων αυτών συγκαταλέγονται τα ακόλουθα (Muñoz-Carpena, 2009):

- Ακρίβεια ($\pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).
- Δεν απαιτείται συνήθως βαθμονόμηση για διαφορετικά εδάφη.
- Δεν έχουν σημαντικές απαιτήσεις συντήρησης.
- Δεν επηρεάζονται από συνήθη επίπεδα αλατότητας.
- Μπορούν να μετρούν και την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Στα μειονεκτήματα αναφέρονται (Muñoz-Carpena, 2009):

- Το σχετικά μεγάλο κόστος.
- Μικρή περιοχή δείγματος (περίπου 3cm ακτίνα γύρω από τους οδηγούς κύματος). Βέβαια το τελευταίο μπορεί να είναι και πλεονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές.

Μέτρηση πεδίου συχνότητας (Frequency Domain - FD): Χωρητικότητα (Capacitance) και Μέτρηση της ισχύος ανάκλασης στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Domain Reflectometry - FDR)

Οι τεχνικές FD είναι παρόμοιες με την TDR. Παρόλα αυτά καθώς η TDR μετρά αλλαγές σε χρονικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού παλμού καθώς ταξιδεύει κατά μήκος των οδηγών κύματος η FD αναλύει αλλαγές στα χαρακτηριστικά

συχνότητας του παλμού (Lin, 2003). Το πλεονέκτημα της τεχνολογίας FD σε σχέση με την TDR είναι το ότι μπορεί να χρησιμοποιεί πολύ μικρότερα μήκη κύματος (<10 cm) και το ότι απαιτεί πολύ πιο απλά ηλεκτρονικά (Pardossi κ.α., 2009).

Μία μάζα υποστρώματος (περιοχή δείγματος) με τις μεταλλικές αιχμές ή πλάκες του αισθητήρα που βρίσκονται μέσα του μπορεί να λειτουργήσει ως πυκνωτής (Muñoz-Carpena, 2009). Ένα παλμοσκόπιο συνδέεται με τα μεταλλικά αυτά στοιχεία του αισθητήρα δημιουργώντας ένα κύκλωμα, οι αλλαγές στην υγρασία του υποστρώματος μπορούν να ανιχνευθούν μέσω των αλλαγών στη συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος. Στους αισθητήρες χωρητικότητας (capacitance) η διηλεκτρική περατότητα βρίσκεται μέσω της μέτρησης του χρόνου φόρτισης του πυκνωτή που έχει δημιουργηθεί. Στους αισθητήρες FDR η συχνότητα του παλμοσκόπιου διατρέχει ένα εύρος συχνοτήτων με σκοπό την εύρεση της συχνότητας συντονισμού (εκεί όπου το εύρος κύματος είναι το μεγαλύτερο) που αποτελεί μέτρο του περιεχομένου σε νερό του υποστρώματος.

Στα πλεονεκτήματα των αισθητήρων αυτών συγκαταλέγονται τα ακόλουθα (Pardossi κ.α., 2009; Muñoz-Carpena, 2009):

- Ακρίβεια ($\pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) κατόπιν όμως βαθμονόμησης.
- Δεν έχουν σημαντικές απαιτήσεις συντήρησης.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε υψηλά επίπεδα αλατότητας (εκεί που τα TDR αποτυγχάνουν).
- Καλύτερη ανάλυση από τα TDR.
- Ορισμένοι τέτοιοι αισθητήρες (που χρησιμοποιούν χαμηλές συχνότητες) είναι πολύ φθηνότεροι από τους TDR.

Στα μειονεκτήματα αναφέρονται (Muñoz-Carpena, 2009):

- Η βαθμονόμηση είναι απαραίτητα (Baas και Straver, 2001; Morel και Michel, 2004).
- Η μικρή περιοχή δείγματος. Βέβαια το τελευταίο μπορεί να είναι και πλεονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές.
- Ότι έχουν την τάση να έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε θερμοκρασία, φαινόμενη πυκνότητα, περιεχόμενο σε άργιλο και κενά αέρα σε σχέση με τα TDR.

Μέτρηση εύρους ανάκλασης (Amplitude Domain Reflectometry - ADR)

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων αυτών είναι η ακόλουθη (Muñoz-Carpena, 2009). Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ταξιδεύει κατά μήκος μίας γραμμής μετάδοσης συναντήσει ένα επίπεδο αλλαγής αντίστασης, μέρος της ενέργειας του κύματος ανακλάται πίσω προς τον μεταδότη. Το ανακλώμενο κύμα αλληλεπιδρά με το προσπίπτον κύμα παράγοντας μία τάση κατά μήκος της γραμμής μετάδοσης. Αν

ο συνδυασμός υποστρώματος – αιχμών αισθητήρα οριοθετούν το επίπεδο αλλαγής αντίστασης, η μέτρηση της διαφοράς μεγέθους των δύο κυμάτων δίνει την αντίσταση υποστρώματος – αισθητήρα.

Στα πλεονεκτήματα των αισθητήρων αυτών συγκαταλέγονται τα ακόλουθα (Muñoz-Carpena, 2009):

- Ακρίβεια $\pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ που βελτιώνεται όμως κατόπιν βαθμονόμησης ($\pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).
- Επιτρέπει μετρήσεις σε πολύ αλατούχα υποστρώματα (έως και 20dS/m)
- Σχετικά φθηνοί.
- Χωρίς επίδραση από τις συνήθεις θερμοκρασίες.

Στα μειονεκτήματα αναφέρονται (Muñoz-Carpena, 2009):

- Η μικρή περιοχή δείγματος. Βέβαια το τελευταίο μπορεί να είναι και πλεονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές.
- Η σημαντική επίδραση που έχουν στις μετρήσεις τα κενά αέρα, τα πετραδάκια ή γενικά μεγάλα τεμάχια στο υπόστρωμα και η κίνηση νερού στην περιοχή δείγματος.

Άλλοι αισθητήρες μέτρησης διηλεκτρικής χωρητικότητας

Γενικά έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές της τεχνολογίας αυτής. Αναφέρονται (Muñoz-Carpena, 2009) οι αισθητήρες μετάδοσης φάσης (Phase Transmission - Virrib) χρονικής επίδρασης μετάδοσης (Time Domain Transmission – TDT).

Γενικά συμπεράσματα σχετικά με τους αισθητήρες μέτρησης διηλεκτρικής χωρητικότητας

Η χρήση των αισθητήρων TDR, FD και ADR μπορεί να είναι παρόμοια με αυτή των тенσιόμετρων (Murray κ.α., 2004). Μπορούν να αντιληφθούν τόσο το ξηρό σημείο αναφοράς που σηματοδοτεί την έναρξη της άρδευσης και επειδή έχουν γρήγορη απόκριση μπορούν επίσης να ελέγξουν και τον τερματισμό αυτής (επομένως να ορίσουν την δόση). Η μεγάλη διαφορά με τα тенσιόμετρα βρίσκεται στο ότι μετρούν σε διαφορετικούς άξονες της Χ.Κ.Υ, τα тенσιόμετρα μετρούν μύζηση ενώ τα TDR, FD και ADR περιεχόμενο σε υγρασία. Αυτό μπορεί να είναι πρόβλημα σε υποστρώματα με Χ.Κ.Υ. με πολύ απότομη μεταβολή υγρασίας σε μικρό εύρος μύζησης (όπως ισχύει για τον πετροβάμβακα στα πρώτα cm μύζησης) όπου η ακρίβεια μέτρησης παίζει ιδιαίτερα σοβαρό λόγο.

Αισθητήρες διηλεκτρικής χωρητικότητας (ή περατότητας) για τη μέτρηση εδαφικής υγρασίας όπως ο ML2 ThetaProbe της Delta T και ο 10HS (ή ακόμη καλύτερα ο EC-5 – λόγω μικρότερου όγκου αναφοράς) της Decagon έχουν την δυνατότητα μετά από σχετική βαθμονόμηση να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο άρδευσης σε υδροπονικά συστήματα (Nemali κ.α., 2007; Miralles κ.α., 2010). Όμως σχετικά πειράματα

(Thompson κ.α., 2007)²⁴ έχουν καταλήξει ότι η χρήση τέτοιων αισθητήρων δεν έχει πάντα ικανοποιητική ακρίβεια εξαιτίας θεμάτων που σχετίζονται με το βάθος ριζοστρώματος, την εκτίμηση της υδατοικανότητας και των ορίων του εύκολα διαθέσιμου νερού, την βαθμονόμηση των αισθητήρων αλλά και την ακρίβειά τους στο εύρος τιμών που ενδιαφέρει. Οι ίδιοι ερευνητές (Thompson κ.α., 2007) θεωρούν ότι οι μετρήσεις του υδατικού δυναμικού του εδάφους είναι πολύ πιο ακριβείς όσο αφορά τον προγραμματισμό αρδεύσεων σε λαχανοκομικές καλλιέργειες εντός θερμοκηπίου.

Άλλοι αισθητήρες που σχετίζονται με την υγρασία στο υπόστρωμα

Οι μετρήσεις άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με την περιεχόμενη υγρασία στο υπόστρωμα μπορούν να αφορούν την μέτρηση των εισροών (άρδευση) και απορροής που μπορούν να συνδυαστούν με μετρήσεις για υπολογισμό ET ώστε να έχουμε υδατικά ισοζύγια. Στην πράξη έχουν αξιολογηθεί συστήματα που σταματούν την άρδευση όταν η απορροή (leaching fraction) φτάσει σε κάποιο προκαθορισμένο ποσοστό της ποσότητας νερού που παρέχεται (Stanghellini και Van Meurs, 1992).

Μετρήσεις άλλων παραμέτρων στο υπόστρωμα

Σε ορισμένες περιπτώσεις σε μοντέλα διαχείρισης της άρδευσης έχουν ενταχθεί και μετρήσεις θερμοκρασίας του υποστρώματος (Stanghellini και De Lorenzi, 1994). Ακόμη έχουν αναφερθεί μετρήσεις της EC του νερού στο υπόστρωμα και στην απορροή (Lea-Cox κ.α., 2009). Οι van Iersel κ.α. (2009) έχουν μετρήσει την EC στο διάλυμα του υποστρώματος με αισθητήρα SigmaProbe (Delta T devices, UK). Παράλληλα μετρούσαν και την υγρασία στο υπόστρωμα με αισθητήρες EC-5 (Decagon, Pullman, WA). Οι Sanchez-Guerrero κ.α. (2009) αξιολόγησαν έλεγχο άρδευσης με στόχο τη διατήρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην απορροή σε σταθερά επίπεδα ($EC = 2.5 \text{ dSm}^{-1}$) την οποία μετρούσαν με φορητό αγωγιμόμετρο (HI8733, Hanna Instruments, Germany) νωρίς κάθε πρωί.

Μία άλλη προτεινόμενη τεχνική ελέγχου για εφαρμογή σε υδροπονικά συστήματα είναι η σύγκριση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του θρεπτικού διαλύματος άρδευσης και αυτής του διαλύματος απορροής. Συνήθως η απορροή είναι της τάξης του 20% του εφαρμοζόμενου όγκου νερού και η EC του διαλύματος απορροής δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 1 dSm^{-1} σε σχέση με το διάλυμα άρδευσης. Εάν η EC της απορροής είναι μεγαλύτερη, αυτό δείχνει ανεπαρκή άρδευση μια και τα φυτά χρησιμοποιούν γρήγορα νερό και τα ιόντα συγκεντρώνονται στο διάλυμα απορροής (Hochmuth, 2001).

²⁴ Σημειώνεται ότι η εργασία τους αφορά καλλιέργειες σε έδαφος.

Υπερ και κατά των διαφόρων τρόπων ελέγχου μέσω αισθητήρων

Τα υδραυλικά τενσιόμετρα αποκρίνονται στην τάση συγκράτησης και επομένως μετρούν ακριβώς την μύζηση που πρέπει να καταβάλουν τα φυτά για να αποσπασουν νερό από το έδαφος. Έχουν μεγαλύτερη ανάλυση σε στεγνότερα υποστρώματα και οι μετρήσεις που δίνουν είναι ελάχιστα ευαίσθητες στον τύπο του υποστρώματος (δεν απαιτείται βαθμονόμηση για κάθε υπόστρωμα) και στην αλατότητα (Thompson κ.α., 2007). Από την άλλη έχουν περισσότερες απαιτήσεις συντήρησης και σε πολύ ξηρά εδάφη δεν δίνουν ακριβείς μετρήσεις. Οι διηλεκτρικοί αισθητήρες για μέτρηση της τάσης πλέγματος (ψ) έχουν καλύτερη ανάλυση σε μεγάλες περιεκτικότητες σε νερό ($0,15 - 0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ή και μεγαλύτερες για τεχνητά υποστρώματα με μεγάλο πορώδες), και δεν απαιτούν πολύ συντήρηση. Από την άλλη χρειάζονται βαθμονόμηση για κάθε τύπο υποστρώματος και επηρεάζονται πολύ από την έλλειψη ομοιομορφίας και για το λόγο αυτό συμπεριφέρονται καλύτερα σε ομοιογενή μέσα όπως η άμμος ή ο πετrobάμβακας (Pardossi κ.α., 2009). Από την άλλη τα τενσιόμετρα έχουν νερό στο εσωτερικό τους το οποίο υπό συνθήκες ισχυρής τάσης συγκράτησης μπορεί να εξέλθει από το όργανο (στις εφαρμογές υδροπονίας όμως αυτό δεν είναι εύκολο να συμβεί). Επομένως όπου αναμένεται να υπάρχουν ισχυρές τέτοιες τάσεις το όργανο χρειάζεται συχνή παρακολούθηση και συντήρηση. Οι αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι γενικά φθηνότεροι από τα τενσιόμετρα και απαιτούν λιγότερη φροντίδα. Από την άλλη επηρεάζονται σημαντικά από την αλατότητα –ακόμη και σε κανονικές συγκεντρώσεις λιπασμάτων- και έχουν μεγάλο χρόνο απόκρισης στις αλλαγές της υγρασίας. Επομένως δεν είναι κατάλληλοι για χρήση σε υποστρώματα.

Οι αισθητήρες διηλεκτρικής χωρητικότητας είναι γενικά περισσότερο πολύπλοκοι όσο αφορά τα ηλεκτρονικά. Για το λόγο αυτό κοστίζουν αρκετά περισσότερο. Βέβαια η τάση είναι να γίνονται όλο και πιο απλοί και φθηνοί και έτσι βρίσκουν όλο και περισσότερο εφαρμογή σε παραγωγικές εγκαταστάσεις. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν μεγάλη επαναληψιμότητα αλλά η ακρίβειά τους δεν είναι πολύ υψηλή (κυρίως λόγω σφαλμάτων βαθμονόμησης και επίδρασης ετερογένειας του υποστρώματος) (Pardossi κ.α., 2009).

Γενικά πολλές από τις τεχνολογίες αισθητήρων υγρασίας που κατασκευάστηκαν αρχικά για χρήση στο έδαφος, δεν πέτυχαν καλά αποτελέσματα σε υποστρώματα καλλιέργειας (Lea-Cox κ.α., 2009). Ο Muñoz-Carpena (2009) προτείνει μία μέθοδο επιλογής, βάση της οποίας υπολογίζει ένα τελικό δείκτη χαρακτηρισμού του αισθητήρα μέσω των απαντήσεων σε μία σειρά ερωτήσεων που αφορούν: το εύρος

μετρήσεων, την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα, τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων, τις απαιτήσεις συντήρησης και προφανώς το κόστος αγοράς.

Συμπεράσματα

Η αποτελεσματική άρδευση συντελεί στην ποσοτική και ποιοτική βελτιστοποίηση της παραγωγής ενώ ταυτόχρονα συμβάλλει στην μείωση των εισροών στην καλλιέργεια και των ανεπιθύμητων εκροών από αυτή. Η διαχείριση της άρδευσης σχετίζεται με τον καθορισμό της συχνότητας και της δόσης που με τη σειρά τους βασίζονται στην εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και στη δυνατότητα συγκράτησης υγρασίας από το υπόστρωμα. Σε πρακτικό επίπεδο η διαχείριση της άρδευσης στα παραγωγικά θερμοκήπια γίνεται συνήθως με μία από τις ακόλουθες προσεγγίσεις:

1. Χρονικός προγραμματισμός
2. Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής μέσω συσσώρευσης προσπίπτουσας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας
3. Μετρήσεις παραμέτρων αποστράγγισης (όγκος απορροής, EC)
4. Μετρήσεις παραμέτρων υποστρώματος (υγρασία, θερμοκρασία, EC)
5. Μοντέλα εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής με χρήση σειράς μετρήσεων συνθηκών περιβάλλοντος

Ο χρονικός προγραμματισμός στην καλύτερη περίπτωση καταρτίζεται με βάση πληροφορίες - υπολογισμούς που προκύπτουν από μοντέλα εξατμισοδιαπνοής - όπως το γενικά αποδεκτό στις ημέρες μας μοντέλο Penman-Monteith (Allen κ.α., 1998, Allen κ.α., 2011α, Allen κ.α., 2011β)-. Από την άλλη πλευρά οι αυτοματισμοί χρησιμοποιούν συνήθως μετρήσεις αισθητήρων που σχετίζονται άμεσα με την εξατμισοδιαπνοή αλλά χωρίς να μετρούνται φυσιολογικές παράμετροι της καλλιέργειας –τυπικό σχετικό παράδειγμα αποτελεί η ηλιακή ακτινοβολία (Stanhill & Scholte, 1974; Lizarrara κ.α., 2003; Katsoulas κ.α., 2006)-. Όμως η γενική αποτελεσματικότητα εφαρμογής τέτοιων προσεγγίσεων για τον έλεγχο της άρδευσης σε θερμοκήπια παραμένει ακόμη υπό συζήτηση (Raviv κ.α., 2002). Πιθανοί λόγοι για αυτό σχετίζονται με τις μεγάλες διακυμάνσεις της φυλλικής επιφάνειας (π.χ. σε ανθοκομικές καλλιέργειες με τη συλλογή των ανθέων), τις επιδράσεις εχθρών και ασθενειών στην διαπνοή, την ανάπτυξη αλατότητας στο υπόστρωμα κοκ. Ακόμη οι ειδικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου (υψηλή σχετική υγρασία, θέρμανση, τεχνητός φωτισμός, συγκέντρωση CO₂ κοκ) δεν είναι εύκολο να συμπεριληφθούν με μεγάλη ακρίβεια, σε απλά (Baille κ.α., 1994) αλλά ακόμη και σε πολύπλοκα μοντέλα εξατμισοδιαπνοής που αναπτύχθηκαν ειδικά για θερμοκηπιακές καλλιέργειες (Stanghellini, 1987; Prenger κ.α., 2002; Donatelli κ.α., 2006). Για το λόγο αυτό το ερευνητικό ενδιαφέρον στράφηκε στην προσέγγιση των άμεσων μετρήσεων

πολλαπλών φυτικών παραμέτρων (προσέγγιση “speaking plant”) όπως το υδατικό δυναμικό των φύλλων, η θερμοκρασία της φυλλικής επιφάνειας, η ροή νερού στους φυτικούς ιστούς, οι αλλαγές στη διάμετρο βλαστών, η μέτρηση της εκπεμπόμενης και ανακλώμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κοκ (Prenger κ.α., 2005). Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να προσφέρουν πληροφορία σχετικά με επικείμενη υδατική καταπόνηση πριν τα σχετικά συμπτώματα γίνουν ορατά, όμως η εφαρμογή τους περιορίζεται κυρίως σε αργά αναπτυσσόμενα φυτά -λόγω της σχετικά αργής χρονικής τους ανταπόκρισης στις αλλαγές των μετρούμενων παραμέτρων (Raviv κ.α., 2002)- και σε καλλιεργητικές τεχνικές που δεν απαιτούν πολύ συχνές αρδεύσεις. Έτσι οι καινοτόμες αυτές προσεγγίσεις παραμένουν στο επίπεδο της επιστημονικής έρευνας και δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμη σε συνθήκες παραγωγής.

Στόχος της εργασίας

Η αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής στο περιβάλλον του θερμοκηπίου παραμένει ένα ανοικτό θέμα και αυτό πραγματεύεται το 4^ο κεφάλαιο της εργασίας. Με δεδομένη την ακρίβεια των μεθόδων εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής η αναζήτηση βέλτιστων προγραμμάτων άρδευσης (συνδυασμού συχνότητας και δόσης αρδευτικών γεγονότων) αποτελεί ένα ενδιαφέρον θέμα στο πλαίσιο της καλλιεργητικής πρακτικής, το οποίο αποτελεί και το αντικείμενο του 5^{ου} κεφαλαίου. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται και μια πρώτη συσχέτιση του προγράμματος άρδευσης με την ανάκλαση από τις καλλιέργειες. Είναι προφανές ότι παραμένει η ανάγκη να αναπτυχθεί μία μέθοδος που θα χρησιμοποιεί ως είσοδο μία ένδειξη –δείκτη- που θα αποδίδει άμεσα την εικόνα της υδατικής κατάστασης του συνόλου της καλλιέργειας (ή της αρδευτικής ζώνης που μας ενδιαφέρει) και θα είναι ικανή όχι μόνο να δείχνει πότε πρέπει να ξεκινήσει η άρδευση (συχνότητα) αλλά και πότε αυτή πρέπει να τερματιστεί (δόση). Στην περίπτωση που θα αναπτυσσόταν ένας τέτοιος δείκτης θα ήταν περιττή η χρήση υπολογιστικών μεθόδων υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής. Ο έλεγχος μέσω του ίδιου δείκτη του συνόλου των παραγόντων (αερισμός, θέρμανση δροσισμός) που επηρεάζουν την υδατική κατάσταση του φυτού είναι κάτι επιθυμητό, το οποίο όμως σε πρώτο στάδιο φαντάζει εξαιρετικά πολύπλοκο μια και είναι πιθανό να υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί που να οδηγούν στην ζητούμενη κατάσταση (Stanghellini και Van Meurs, 1992). Στο πλαίσιο αυτό το 6^ο και το 7^ο κεφάλαιο πραγματεύονται την δυνατότητα χρήσης δεικτών ανάκλασης για τον προσδιορισμό της υδατικής καταπόνησης θερμοκηπιακών καλλιεργειών.

Στην άλλη πλευρά του συνεχούς, στο υπόστρωμα, η μέτρηση παραμέτρων όπως η υγρασία και η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχουν πολύ καλές προοπτικές για τη χρήση τους είσοδοι σε συστήματα ελέγχου άρδευσης, είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με

άλλους αισθητήρες. Μία σειρά από προβλήματα παραμένουν όμως ανοικτά, και αυτό είναι το θέμα του 8^{ου} κεφαλαίου όπου γίνονται σχετικές πειραματικές αξιολογήσεις.

Βασικός σκοπός της διατριβής αυτής ήταν η μελέτη των δυνατοτήτων διαχείρισης της άρδευσης σε παραγωγικά θερμοκήπια ως μιας καλλιεργητικής εργασίας που επηρεάζεται από το σύνολο των παραγόντων του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση μίας σειράς υφιστάμενων και νέων δεικτών υδατικής κατάστασης του φυτού που βασίζονται σε δεδομένα που προέρχονται από ανάκλαση ακτινοβολίας από την καλλιέργεια, με σκοπό τον εντοπισμό αυτών που μπορούν να έχουν πρακτική εφαρμογή στην διαχείριση της άρδευσης σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες, μελετήθηκε η απόκριση υφιστάμενων αισθητήρων που σχετίζονται με την υδατική κατάσταση του υποστρώματος σε συνθήκες υδροπονικών καλλιεργειών στο θερμοκήπιο και έγινε αναφορά στη δυνατότητα αυτόματου ελέγχου της άρδευσης μέσω μέτρησης παραμέτρων του εναέριου περιβάλλοντος και του ριζοστρώματος σε θερμοκήπια που εντάσσονται σε έργα πράσινου (συγκεκριμένα σε βοτανικούς κήπους).

Το πειραματικό μέρος της έρευνας διεξήχθη σε τυπικά σύγχρονα ελληνικά θερμοκήπια (στις εγκαταστάσεις του τμ. Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου του ΤΕΙ Ηπείρου στην Άρτα και της Γεωπονικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο) και αφορούσε λαχανοκομικές και ανθοκομικές καλλιέργειες (για την ακρίβεια πιπεριά, ζέρμπερα, ρόκα και τομάτα).

Κεφάλαιο 3 - Υλικά, μέθοδοι και τεχνικές

Στο πλαίσιο της έρευνας υλοποιήθηκε η ακόλουθη σειρά μετρήσεων και πειραμάτων:

1. Δοκιμές και πειράματα συσχέτισης υδατικής καταπόνησης και συνθηκών εναέριου περιβάλλοντος με τους δείκτες που θα μελετηθούν (θερμικούς και φασματικούς).
2. Πειράματα για εντοπισμό τιμών των δεικτών που θα σηματοδοτούν ανάγκη για ενεργοποίηση ή και τερματισμό της άρδευσης σε διάφορες θερμοκηπιακές καλλιέργειες (ενδείξεις για τις τιμές αυτές θα υπάρχουν πιθανότητα και από τα πρώτα πειράματα).
3. Πειραματικές μετρήσεις με σκοπό την αξιολόγηση της χρήσης αισθητήρων παραμέτρων υποστρώματος για προσαρμογή προγραμμάτων άρδευσης που βασίζονται σε συγκέντρωση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Στα πειράματα μία μεταχείριση αφορούσε μάρτυρα (control) ο οποίος αρδεύταν συμβατικά με βάση υπολογισμό υδατικών αναγκών με κάποιο αναγνωρισμένο μοντέλο εξατμισοδιαπνοής για το περιβάλλον θερμοκηπίου και προγραμματισμό με βάση συσσώρευση ακτινοβολίας ή απλό χρονικό προγραμματισμό και μία έως τρεις (ανάλογα με την επάρκεια εξοπλισμού) μεταχειρίσεις (test treatments) στις οποίες εφαρμόζονταν υδατική καταπόνηση σε διάφορα επίπεδα. Υδατική καταπόνηση επιτεύχθηκε επίσης με περιόδους πλήρους αναστολής της άρδευσης (Kacira και Ling, 2002; Thompson κ.α., 2007). Οι μετρήσεις αφορούσαν (σε πλήρη διάθεση εξοπλισμού):

1. Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου:
 - a. Ολική ακτινοβολία πάνω και κάτω από το επίπεδο της κόμης της καλλιέργειας
 - b. Καθαρή ακτινοβολία πάνω και κάτω από το επίπεδο της κόμης της καλλιέργειας
 - c. Θερμοκρασία και υγρασία αέρα πάνω, κάτω και μέσα στο επίπεδο της κόμης της καλλιέργειας
 - d. Ταχύτητα αέρα
 - e. Εξατμισοδιαπνοή μέσω μετρήσεων βάρους και μετρήσεων άρδευσης - απορροής (ισοζύγιο).
 - f. pH και EC νερού άρδευσης και απορροής
 - g. Θερμοκρασία φύλλου (σε πολλά σημεία καθώς και σε υγραμένα και μη-διαπνέοντα φύλλα αναφοράς)

- h. Δείκτη φυλλικής επιφάνειας και γεωμετρικά χαρακτηριστικά φύλλων και καλλιέργειας.
 - i. Μετρήσεις ανακλαστικότητας της καλλιέργειας σε διάφορα μήκη κύματος.
 - j. Στοματική αγωγιμότητα φύλλων
 - k. Καταγραφή αρδευτικών γεγονότων (χρόνος και διάρκεια)
 - l. Καταγραφή παραμέτρων υποστρώματος (υγρασία, ηλεκτρική αγωγιμότητα, θερμοκρασία)
 - m. Μετρήσεις ομοιομορφίας του συστήματος στάγδην άρδευσης
 - n. Ποσότητα νερού άρδευσης και ποσότητα απορροής
 - o. Μορφολογικά και παραγωγικά δεδομένα (μέγεθος φυτών, ποιότητα και ποσότητα παραγωγής).
2. Στο εξωτερικό του θερμοκηπίου:
- a. Ολική ακτινοβολία, θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου.

Με βάση τις μετρήσεις αυτές έγιναν τα ακόλουθα:

- σύγκριση μετρημένης εξατμισοδιαπνοής με αντίστοιχες τιμές υπολογιστικών μοντέλων,
- αξιολόγηση της συσχέτισης των μετρήσεων ανάκλασης σε διάφορα μήκη κύματος αλλά και σύνθετων σχετικών δεικτών με θερμοκρασία φύλλων, διαφορά θερμοκρασίας αέρα-φύλλου, δείκτης υδατικής καταπόνησης φυτού (CWSI), στοματική αγωγιμότητα φύλλων και ένταση εξατμισοδιαπνοής.
- μελέτη της δυνατότητας χρήσης φασματικών δεικτών ανάκλασης της καλλιέργειας για τη διαχείριση άρδευσης (εντοπισμός τιμών ορόσημων όσο αφορά την έναρξη της υδατικής καταπόνησης και εξισώσεων πρόβλεψης της πορείας αποκατάστασης) και
- διαχείριση -με χρήση αισθητήρων παραμέτρων υποστρώματος- προγραμμάτων άρδευσης που βασίζονται σε πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι συγκρίσεις σε πολλές περιπτώσεις έγιναν σε επίπεδο παραγωγής των φυτών (ποσότητα –νωπό βάρος- και ποιότητα) καθώς και σε επίπεδο αποτελεσματικότητας χρήσης νερού. Οι μετρήσεις ανάλογα με την περίοδο λάμβαναν υπόψη και τα διάφορα συστήματα ελέγχου του κλίματος (θέρμανση, φυσικός αερισμός, δροσισμός) τα οποία βρίσκονταν σε λειτουργία.

Διατάξεις και εξοπλισμός μετρήσεων

Μία σειρά από όργανα μέτρησης κλιματικών παραμέτρων, κατάστασης φυτού και αρδευτικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας αυτής. Στα κεφάλαια που αφορούν την μελέτη συγκεκριμένων παραγόντων της υδατικής κατάστασης γίνεται αναφορά στα ειδικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά. Εδώ θα γίνει παρουσίαση του γυάλινου θερμοκηπίου AAT του ΤΕΙ Ηπείρου όπου πραγματοποιήθηκε μεγάλο μέρος των δοκιμών και των πειραμάτων και του πλαστικού θερμοκηπίου του Εργ. Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας όπου πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από δοκιμές. Ακόμη θα γίνει αναφορά στο φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο που αποτελούσε το ειδικότερο όργανο μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος θα γίνει αναφορά στη βασική μεθοδολογία κατάστροφης προγράμματος άρδευσης που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές αξιολόγησης και στα πειράματα.

Γυάλινο θερμοκήπιο AAT του ΤΕΙ Ηπείρου

Το γυάλινο θερμοκήπιο του τμήματος Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου βρίσκεται στην τεχνόπολη του Τ.Ε.Ι. στους Κωστακιούς Άρτας (συντεταγμένες²⁵: 39°7' Β, 20°56' Α, υψόμετρο 5 m).

Το θερμοκήπιο είναι αμφικλινές, διπλό, με προσανατολισμό κορφιά Α-Δ. Η κάλυψη είναι από υαλοπίνακες μαρτελέ, πάχους 4 mm. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου είναι: ύψος υδρορροής = 3,15 m, ύψος κορφιά = 4,40 m, πλάτος κόλπου = 6,50 m, μήκος = 46 m, εμβαδόν = 600 m², όγκος = 2270 m³. Το πάτωμα είναι στρωμένο με σκυρόδεμα.

Ο αερισμός γίνεται από δύο συνεχή ανοίγματα στην οροφή (στη βόρεια πλευρά κάθε κόλπου) και ένα πλαϊνό άνοιγμα στην νότια πλευρά, τα οποία συνδέονται με άρθρωση στο πάνω μέρος τους. Τα ανοίγματα έχουν μήκος 45,90m, αυτά της οροφής έχουν πλάτος 1,55m και μέγιστο εμβαδόν 43m² ενώ το πλαϊνό έχει ύψος 1,00m και μέγιστη επιφάνεια 23m². Εκτός του φυσικού αερισμού για τον έλεγχο του κλίματος χρησιμοποιούνται συνολικά 6 μονάδες υδρονέφωσης ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος της μεσαίας υδρορροής του θερμοκηπίου (ML Princess 2, ML System, με 8 ακροφύσια ανά μονάδα και ανεμιστήρα κατακόρυφης κίνησης αέρα, πίεση λειτουργίας 40bar και παροχή 36 L h⁻¹ για την κάθε μονάδα). Ακόμη υπάρχει εγκατεστημένη κουρτίνα σκίασης από νήμα αλουμινίου (στο ύψος της υδρορροής με κίνηση κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης, επιτυγχάνει σκίαση της τάξης του 50% σύμφωνα με τον κατασκευαστή). Τέλος για τη ρύθμιση του κλίματος υπάρχει

²⁵ Συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87, X: 234712,17 m, Y: 4333915,20 m

σύστημα θέρμανσης με σωληνώσεις ζεστού νερού περιμετρικά και εντός του θερμοκηπίου.



Εικόνα 27 Γυάλινο θερμοκήπιο Τμ. ΑΑΤ ΤΕΙ Ηπείρου

Η καλλιέργεια γίνεται σε πάγκους (ύψος, μήκος, πλάτος: 0,86 m, 4,96 m και 1,10 m, αντίστοιχα). σε κάθε πάγκο υπάρχουν 2 κανάλια μήκους 4,96 m και πλάτους 0,25 m σε απόσταση 0,40 m μεταξύ τους. Συνολικά είναι εγκατεστημένοι 36 πάγκοι σε τρεις ομάδες (Front, Middle, Back) των 12.

Όσο αφορά το σύστημα άρδευσης (παροχή θρεπτικού διαλύματος), τα τμήματα Front και Back λειτουργούν ως ομάδες των δώδεκα πάγκων η κάθε μία. Το μεσαίο τμήμα όμως είναι χωρισμένο 4 υποομάδες των 3 πάγκων η κάθε μία, γεγονός που δίνει ευελιξία όσο αφορά το σχεδιασμό πειραμάτων (δυνατότητα έως και 4 διαφορετικών μεταχειρίσεων με 3 επαναλήψεις η κάθε μία). Όλα τα συστήματα (κλίμα, θρέψη και άρδευση) ελέγχονται από ειδική μηχανή και λογισμικό της Autonet (Savvas και Tsirogiannis, 2002).



Εικόνα 28 Σύστημα ελέγχου κλίματος και θρέψης Autonet

Όσο αφορά την διαχείριση της άρδευσης υπάρχει δυνατότητα χρονικού προγραμματισμού αλλά και ελέγχου με βάση το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας (η μέτρηση γίνεται από πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου ώστε να μην επηρεάζεται από σκιάσεις του σκελετού ή του υλικού κάλυψης).

Στο γυάλινο θερμοκήπιο AAT, για την άρδευση χρησιμοποιείται σύστημα στάγδην με ρυθμιζόμενους σταλάκτες (pressure-compensating emitters). Κάθε σταλάκτης έχει παροχή²⁶ $2,2\text{ l h}^{-1}$. Εκτιμήσεις ομοιομορφίας του συστήματος σύμφωνα με την μεθοδολογία σχετικών προδιαγραφών (ASAE, 1996) έχουν καταγράψει τιμές του CU της τάξης του 90-95%.

²⁶ Οι σταλάκτες αντικαθίστανται κάθε 2-3 έτη ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή ομοιομορφία. Για το λόγο αυτό η παροχή τους πρέπει να ελέγχεται κάθε φορά.



Εικόνα 29 Εσωτερική άποψη του θερμοκηπίου την περίοδο του πειράματος σχετικά με τη συχνότητα άρδευσης σε καλλιέργεια ζέρμπερας (2008-2009)

Πλαστικό θερμοκήπιο Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος ΠΘ

Πρόκειται για ένα από τα θερμοκήπια του Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που βρίσκεται στο αγρόκτημα της Σχολής Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο (συντεταγμένες: 39° 44' Β, 22° 79' Α²⁷, υψόμετρο 85 m). Το θερμοκήπιο (GR_01) είναι απλό τροποποιημένο τοξωτό με επιφάνεια 160m² (20m μήκος και 8m πλάτος), με προσανατολισμό Β-Ν, ύψος κορφιά 4,1m και ύψος υδροροής 2,9m. Είναι

²⁷ Συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87, Χ: 441295,18 m, Υ: 4398097,24 m

κατασκευασμένο από γαλβανισμένο χάλυβα και έχει κάλυψη από απλό φιλμ πολυαιθυλενίου.

Ο φυσικός αερισμός γίνεται μέσω δύο πλαινών ανοιγμάτων και ενός ανοίγματος οροφής που διατρέχουν όλο το μήκος του θερμοκηπίου. Υπάρχει εγκατεστημένος αναμικτήρας αέρα. Το θερμοκήπιο είναι προσαρμοσμένο για υδροπονική καλλιέργεια. Το έδαφος πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές πλαστικό λευκό-μαύρο με τη λευκή πλευρά προς τα επάνω. Η καλλιέργεια γίνεται σε χαμηλούς πάγκους-στηρίγματα μεταβλητού ύψους. Υπάρχουν 4 τέτοιοι πάγκοι κατά μήκος του θερμοκηπίου, ο καθένας από τους οποίους φιλοξενεί δύο κανάλια. Το θερμοκήπιο είναι εξοπλισμένο με αερόθερμο και σωλήνες ζεστού νερού κάτω από τους πάγκους.



Εικόνα 30 Πλαστικό θερμοκήπιο Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του ΠΘ

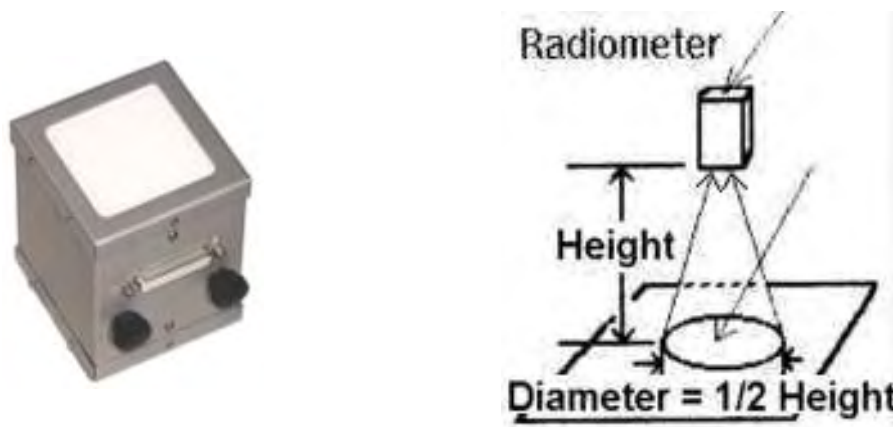
Στο θερμοκήπιο, για την άρδευση χρησιμοποιείται σύστημα στάγδην με ρυθμιζόμενους σταλάκτες (pressure-compensating emitters). Κάθε σταλάκτης έχει παροχή 2 l h^{-1} . Εκτιμήσεις ομοιομορφίας του συστήματος σύμφωνα με την μεθοδολογία σχετικών προδιαγραφών (ASAE, 1996) έχουν καταγράψει τιμές του CU της τάξης του 90-95%.

Η διαχείριση των διαφόρων συστημάτων ελέγχου περιβάλλοντος καθώς και του συστήματος θρέψης γίνεται μέσω συστήματος MACQU (Geomations A.E.). Όσο αφορά την διαχείριση της άρδευσης υπάρχει δυνατότητα χρονικού προγραμματισμού αλλά και ελέγχου με βάση το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας (η μέτρηση γίνεται από πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου ώστε να μην επηρεάζεται από σκιάσεις του σκελετού ή του υλικού κάλυψης).

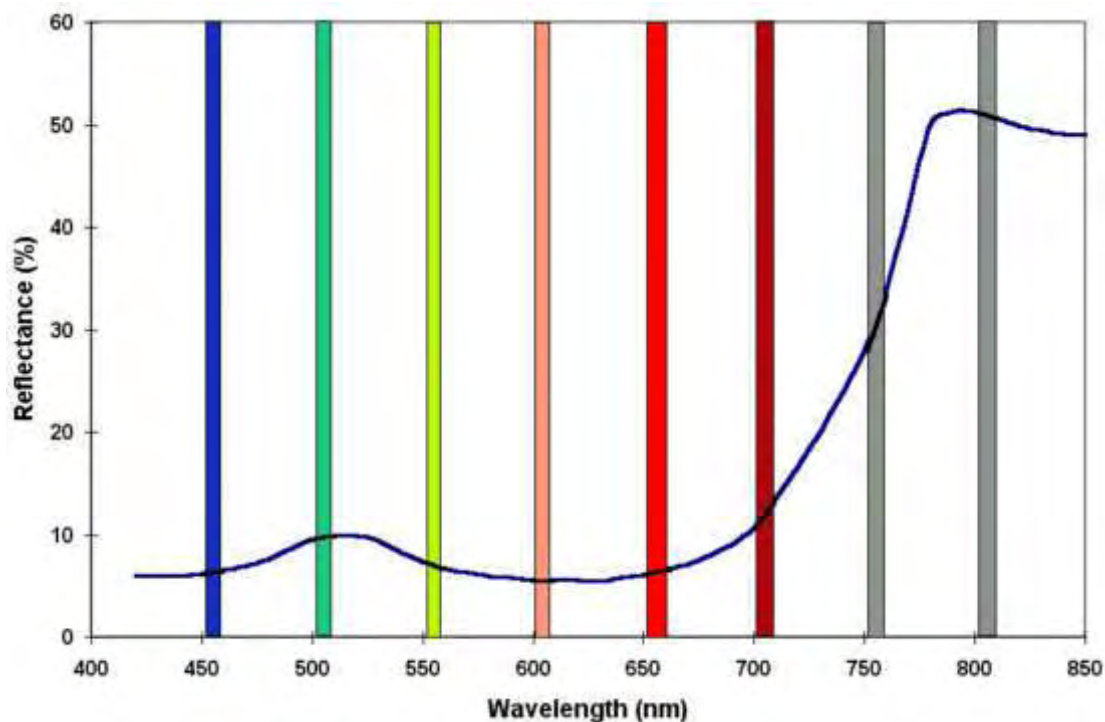
Φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο και τεχνική χρήσης του εντός του θερμοκηπίου

Για την μέτρηση της ανακλώμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της καλλιέργειας χρησιμοποιήθηκε ένα φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο (MSR87, CropScan Inc., Rochester, USA) το οποίο μετρά σε 8 στενές φασματικές λωρίδες κεντραρισμένες στα ακόλουθα μήκη κύματος (σε nm): 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810.

Το όργανο αποτελείται από τον αισθητήρα, τη ράβδο προσάρτησης του αισθητήρα, το πληκτρολόγιο ελέγχου και τον υπολογιστή – καταγραφικό. Χαρακτηριστικό του οργάνου είναι ότι η διάμετρος της περιοχής αποτύπωσης είναι ίση με το μισό του ύψους του οργάνου πάνω από την επιφάνεια από την οποία καταγράφεται η ανάκλαση (Εικόνα 31).



Εικόνα 31 Φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο CropScan



Εικόνα 32 Τυπικό διάγραμμα ανάκλασης από φυτική επιφάνεια (CropScan, σημειώνονται οι περιοχές μέτρησης του MultiSpectral Radiometer 87)

Χρήση CropScan, MSR μέσα στο θερμοκήπιο

Η λήψη μετρήσεων με πολυφασματικό ραδιόμετρο εντός θερμοκηπίου αποτέλεσε από την πρώτη στιγμή μία πρόκληση καθώς η βασική υπόθεση στην οποία βασίζεται η λειτουργία του οργάνου «η πυκνότητα ροής ακτινοβολίας που φτάνει στους αισθητήρες που μετρούν προσπίπτουσα ακτινοβολία (επάνω πλευρά του οργάνου) είναι ίδια με αυτή που προσπίπτει στην επιφάνεια στόχο (φυλλική επιφάνεια) για την οποία μετράμε την ανάκλαση» τίθεται υπό αμφισβήτηση μια και το πλήθος εμποδίων που υπάρχουν στο θερμοκήπιο (σκελετός, εξοπλισμός κοκ) δημιουργούν πολύ έντονες τοπικές διαφοροποιήσεις στο φωτισμό.

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έγινε επικοινωνία με την κατασκευάστρια εταιρεία (Nantt, 2008) και μετά από μία σειρά συστάσεων και δοκιμών καταλήξαμε στην ακόλουθη λύση. Χρησιμοποιούνται μόνο οι κάτω αισθητήρες του οργάνου (αυτοί που μετρούν ανάκλαση). Αυτό είναι δυνατό μέσω κατάλληλων επιλογών στο λογισμικό διαχείρισης του οργάνου. Ένα λευκό ματ πάνελ, μεγέθους 1m^2 τοποθετούνταν στο επίπεδο της φυλλικής επιφάνειας. Πριν από κάθε μέτρηση ανάκλασης από τη φυλλική επιφάνεια γίνεται μία μέτρηση ανάκλασης από την λευκή επιφάνεια με σκοπό να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας αναφοράς κατά την επεξεργασία των μετρήσεων (Εικόνα 33). Ακόμη στην αρχή κάθε σειτ μετρήσεων λαμβάνεται μία

μέτρηση ανάκλασης από πολύ σκοτεινή επιφάνεια μια και αυτό χρειάζεται στο λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων ανάκλασης. Ένα άλλο ζήτημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι ότι ενώ η χρήση του λευκού πάνελ μπορούσε να απομακρύνει θορύβους από διαφορές στο φωτισμό και σκιές δεν μπορούσε να κάνει το ίδιο και για διαφορές στην ανάκλαση που προέρχονταν από ακάλυπτο υπόστρωμα, την υγρασία που έμενε σε επιφάνειες μετά από άρδευσης, τους πάγκους φύτευσης κοκ. Για το σκοπό αυτό όλες οι πιθανώς εκτεθειμένες επιφάνειες καλύπτονταν από μαύρο ματ ύφασμα κατά την περίοδο των μετρήσεων.



Εικόνα 33 Μετρήσεις ανακλαστικότητας με πολυφασματικό ραδιόμετρο πάνω φυτική επιφάνεια και επιφάνεια αναφοράς (λευκή)

Γενική μεθοδολογία υπολογισμού προγράμματος άρδευσης στο θερμοκήπιο

Όπως αναφέρθηκε και στα δύο θερμοκήπια όσο αφορά την διαχείριση της άρδευσης υπάρχει δυνατότητα χρονικού προγραμματισμού αλλά και ελέγχου με βάση το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας (η μέτρηση γίνεται από πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου ώστε να μην επηρεάζεται από σκιάσεις του σκελετού ή του υλικού κάλυψης). Αυτού του είδους ο αυτοματισμός –που βασίζεται στον κύριο παράγοντα που επηρεάζει την εξατμισοδιαπνοή- είναι δοκιμασμένος και παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα (Stanhill και Scholte, 1974; Roh και Lee, 1996; Katsoulas κ.α., 2006). Σε κάθε περίπτωση όμως για την ρύθμιση της άρδευσης απαιτείται η γνώση ορισμένων χαρακτηριστικών των φυτών και της καλλιέργειας. Οι βασικές παράμετροι υπολογισμού –ποσότητα νερού (δόση) που θα εφαρμοστεί (IR) και συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας (συχνότητα) που σηματοδοτεί την έναρξη της

άρδευσης (R_{Go}) υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις που αποτελούν παραλλαγή της μεθόδου παρουσιάζεται από τους Katsoulas κ.α. (2006):

$$IR = \frac{T_r}{(1 - dr/100)} E_i$$

Εξίσωση 15 Δόση άρδευσης

όπου: dr είναι το ποσοστό απορροής (%), E_i η αποτελεσματικότητα του συστήματος άρδευσης και T_r είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ($kg\ m^{-2}$) η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (έχει αναπτυχθεί από την ομάδα του Σταθμού Βιοκλιματολογίας του Institut National de la Recherche Agronomique (I.N.R.A.) στην Avignon της Γαλλίας και έχει δοκιμαστεί σε περιοχές της Μεσογειακής λεκάνης):

$$T_r = \zeta R_{Go}$$

Εξίσωση 16 Ανάγκες καλλιέργειας σε νερό

όπου: R_{Go} είναι το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο της ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου ($kJ\ m^{-2}$) και ζ ένας συντελεστής που μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\zeta = K_c \tau \alpha / \lambda$$

Εξίσωση 17 Συντελεστής αναγκών ζ

όπου: K_c είναι ο φυτικός συντελεστής, τ η περατότητα του καλύμματος του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία (μέσος λόγος εισερχόμενης προς εξωτερική ακτινοβολία), α ο συντελεστής εξάτμισης ο οποίος εκφράζει το μέρος της ενέργειας της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα μέσω της διαπνοής και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού ($kJ\ kg^{-1}$)

Σημαντική παράμετρος των υπολογισμών είναι η αποτελεσματικότητα της άρδευσης (E_i). Η αποτελεσματικότητα της άρδευσης όπως έχει ήδη αναφερθεί (Εξίσωση 6) αποτελεί μέτρο της ποσότητας του νερού που χρησιμοποιείται ωφέλιμα από τα φυτά. Η αποτελεσματικότητα προκύπτει από μετρήσεις και εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών του αρδευτικού συστήματος καθώς και των πρακτικών διαχείρισης που ακολουθούνται. Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος άρδευσης δεν μπορεί να μετρηθεί στην αρχή μίας καλλιεργητικής περιόδου, μπορεί όμως να εκτιμηθεί μέσω της ομοιομορφίας της άρδευσης. Από την άλλη, σύμφωνα με σχετική έρευνα (Burt κ.α., 1997; Dukes, 2000; ASAE, 2001) οι δείκτες ομοιομορφίας ενός συστήματος άρδευσης δίνουν μία εκτίμηση της πιθανής αποτελεσματικότητας εάν γίνεται ορθολογική διαχείριση του συστήματος. Με άλλα λόγια η αποτελεσματικότητα δύσκολα μπορεί να ξεπεράσει την ομοιομορφία του συστήματος (Dukes, 2000). Η ομοιομορφία σχετίζεται με τους παράγοντες απόδοσης που συνδέονται με τη

μεταβλητότητα της παροχής νερού από τις εξόδους του συστήματος. Ένα σύστημα στάγδην άρδευσης έχει τη δυνατότητα να είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό. Σε κάθε περίπτωση το νερό θα πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα, δηλαδή σε κάθε φυτό να διατίθεται πρακτικά η ίδια ποσότητα νερού (ASAE, 1996; ASAE, 2001). Μάλιστα η υψηλή ομοιομορφία έχει ιδιαίτερη σημασία εάν το νερό περιέχει και τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών –υδροπονία-. Εάν δεν συμβαίνει αυτό η ανάπτυξη και η παραγωγή των φυτών θα έχει και αυτή ανάλογη μεταβλητότητα (Smajstrla κ.α., 2002). Η ομοιομορφία εξαρτάται τόσο από την κατανομή της πίεσης στο σύστημα αλλά και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των σταλακτών. Για τον υπολογισμό της ομοιομορφίας σε συστήματα στάγδην χρησιμοποιούνται δείκτες όπως ο συντελεστής ομοιομορφίας Christiansen (Christiansen's uniformity coefficient, CU; Christiansen, 1942; Runbin και Clifford, 2009), ο συντελεστής ομοιομορφίας ενστάλαξης (Emission Uniformity, EU; Keller και Karmeli, 1974).

Τέλος είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι σε κάθε περίπτωση πρέπει να γίνεται έλεγχος κατά την εφαρμογή οποιουδήποτε προγράμματος άρδευσης. Πολλές φορές μάλιστα χρειάζονται μικρορυθμίσεις στο πλαίσιο μίας διαδικασίας ελέγχου σφάλματος (trial – error) ώστε το θεωρητικά καταρτισμένο πρόγραμμα άρδευσης να ταιριάζει με τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν. Ο περισσότερο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου είναι μέσω του ελέγχου της υγρασίας του εδάφους ή της απορροής στην περίπτωση υποστρωμάτων (συστήματα συγκέντρωσης απορροής ή δοχεία-σάκοι ελέγχου στους οποίους συγκεντρώνεται η απορροή ημέρας).

Κεφάλαιο 4 - Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού υδατικών αναγκών θερμοκηπιακής καλλιέργειας πιπεριάς

Εισαγωγή

Η σημερινή πρακτική, όσον αφορά τη διαχείριση της άρδευσης στις θερμοκηπιακές εκμεταλλεύσεις της χώρας μας στηρίζεται κατά κύριο λόγο στην εμπειρία του παραγωγού και στις πρακτικές που έχουν επικρατήσει σε κάθε περιοχή για τις διάφορες καλλιέργειες. Παρόλα αυτά, για τον προγραμματισμό της άρδευσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι οι οποίες βασίζονται σε πληροφορίες όπως: η υγρασία στο ριζόστρωμα, το δυναμικό του νερού στα φύλλα, παράγοντες του μικροκλίματος σε συνδυασμό με παραμέτρους της καλλιέργειας, θερμοκρασία φύλλων κ.λ.π. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην περίπτωση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, αισθητήρες ελέγχου κλιματικών παραμέτρων τοποθετημένοι μέσα (θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση CO₂), ή έξω από το θερμοκήπιο (ολική ηλιακή ακτινοβολία) είναι γενικά διαθέσιμοι και παρέχουν πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο στον έλεγχο του μικροκλίματος αλλά και στον προγραμματισμό της άρδευσης. Η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα συνίσταται στην εκτίμηση της διαπνοής της καλλιέργειας με βάση την ηλιακή ακτινοβολία. Γενικότερα παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των εκτιμήσεων της υδατοκατανάλωσης που παρέχουν οι διάφορες προσεγγίσεις, τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό η σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής στο εσωτερικό του θερμοκηπίου απασχολεί αρκετούς ερευνητές (Prenger κ.α., 2002; Mrusia, 2006; Donatelli κ.α., 2006).

Στο πλαίσιο της παρούσας πειραματικής διερεύνησης γίνεται σύγκριση πειραματικών μετρήσεων εξατμισοδιαπνοής υδροπονικής καλλιέργειας πιπεριάς (*Capsicum annuum* L.) σε θερμοκήπιο με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέκυψαν από δύο υπολογιστικές προσεγγίσεις.

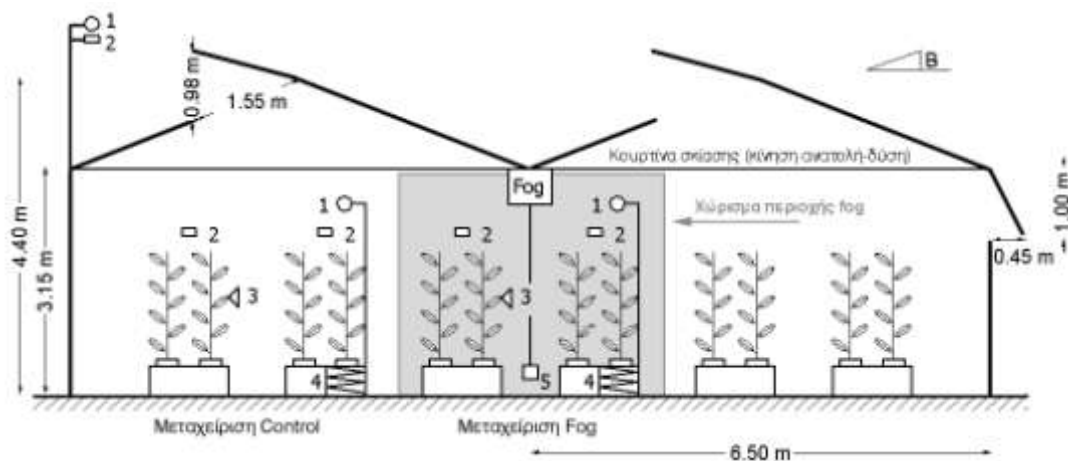
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος

Θερμοκήπιο και φυτικό υλικό

Οι μετρήσεις έγιναν στο πλαίσιο ενός γενικότερου πειράματος που αφορούσε τη μελέτη της θρέψης αλλά και του κλίματος υδροπονικής καλλιέργειας πιπεριάς (*Capsicum annuum* L. cv. Calyx F1) το οποίο διεξήχθη την περίοδο από Ιούλιο έως Νοέμβριο 2005 στο γυάλινο θερμοκήπιο του τμήματος Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου στους Κωστακιούς Άρτας (αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασης και του εξοπλισμού έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο).

Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το μεσαίο τμήμα του θερμοκηπίου ($1/3$ της έκτασης: 160m^2) που αποτελείται από 12 πάγκους. Σε κάθε πάγκο φυτεύτηκαν 15 φυτά / κανάλι σε γλάστρες των 4 L με υπόστρωμα ελαφρόπετρας στο ένα κανάλι και σάκους Fytocell, μήκους 1 m στο άλλο. Τα κανάλια ήταν σκεπασμένα με αδιαφανές πλαστικό φύλλο ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η εξάτμιση από αυτά. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν $2,60$ φυτά m^{-2} . Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και οι θέσεις των οργάνων μέτρησης των κλιματικών παραμέτρων.

Τέσσερις πάγκοι πάνω από τους οποίους ήταν δύο μονάδες υδρονέφωσης απομονώθηκαν με πλαστικό φύλλο που έφτανε έως το ύψος της υδρορροής και αποτελούσαν το τμήμα Fog. Άλλοι τέσσερις πάγκοι αποτελούσαν το τμήμα Control. Οι κλιματικές ρυθμίσεις κατά την περίοδο του πειράματος είχαν ως εξής: συνεχής λειτουργία της υδρονέφωσης από 10:00 έως 18:00 με στόχο την διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο 80%, διατήρηση των ανοιγμάτων ανοικτών όσο η θερμοκρασία στην περιοχή Fog ήταν μεγαλύτερη των 26°C , διατήρηση της κουρτίνας ανοικτής με κάλυψη 80% της επιφάνειας του θερμοκηπίου ώστε να μην εμποδίζεται ο φυσικός αερισμός και διαχείριση άρδευσης με βάση το άθροισμα της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας με ποτίσματα ανά 350 Wh κατά μέσο όρο και στόχο απορροής 35%.



Εικόνα 34 Τομή του θερμοκηπίου με την πειραματική εγκατάσταση και τα όργανα μέτρησης των κλιματικών παραμέτρων: 1-πυρανόμετρο, 2-αισθητήρας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασία αέρα, 3-θερμοζεύγη για μέτρηση θερμοκρασίας φύλλου, 4-λυσιμετρικοί ζυγοί και 5-παροχόμετρο.

Μετρήσεις και υπολογισμοί

Σκοπός της διερεύνησης είναι να γίνει υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας με δύο κοινά αποδεκτά μοντέλα: τη μέθοδο FAO Penman-Monteith (FAO P-M, Εξίσωση 15) (Allen κ.α., 1998) σε συνδυασμό με κατάλληλους φυτικούς συντελεστές που αφορούν την ειδική περίπτωση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών και τη μέθοδο Stanghellini (Stanghellini, 1987; Prenger κ.α., 2002; Mrusia, 2006; Donatelli κ.α., 2006) που τροποποιεί την σχέση Penman-Monteith με σκοπό τον άμεσο υπολογισμό των υδατικών αναγκών των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Οι εκτιμήσεις των μοντέλων συγκρίνονται με άμεσες μετρήσεις της εξατμισοδιαπνοής.

$$ET_c = K_c \times ET_o = K_c \times \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Εξίσωση 18 Σχέση υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής κατά Penman-Monteith

$$ET_c = 2LAI \frac{1}{\lambda} \times \left(\frac{\Delta(R_{nSt} - G) + 86400 \frac{(e_s - e_a) \rho C_p}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right)$$

$$R_{nSt} = 0,07R_{ns} - \frac{252 \rho C_p (T - T_c)}{r_R}, \quad r_R = \frac{\rho C_p}{4\sigma(T + 273,15)^3}$$

Εξίσωση 19 Τροποποιημένες σχέσεις Penman-Monteith για εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής εντός θερμοκηπίου

όπου, ET_c : δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm day^{-1}), K_c : φυτικός συντελεστής (αδιάστατος), ET_o : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για κανονικές συνθήκες (mm day^{-1}), R_n : καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας (R_{nSt} : υπολογισμένη σύμφωνα με το μοντέλο Stanghellini (1987)) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), R_{ns} : ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος εντός του θερμοκηπίου ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G : ροή θερμότητας προς το έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T : μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε ύψος 2 m ($^{\circ}\text{C}$), T_c : μέση ημερήσια θερμοκρασία φύλλου ($^{\circ}\text{C}$), u_2 : ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m (m s^{-1}), e_s : πίεση υδρατμών στο κορεσμό (για θερμοκρασία αέρα) (kPa), e_a : πίεση υδρατμών (για θερμοκρασία αέρα) (kPa), Δ : κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), LAI : δείκτης φυλλικής επιφάνειας (επιφάνεια φύλλων ανά επιφάνεια εδάφους ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), ρ : πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (MJ kg^{-1}), C_p : ειδική θερμότητα αέρα υπό σταθερή πίεση ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), σ : σταθερά Stefan-Boltzman ($\text{MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ day}^{-1}$), r_a : αεροδυναμική αντίσταση της καλλιέργειας (μέση τιμή ημέρας) (s m^{-1}), r_s : στοματική αντίσταση της καλλιέργειας (μέση τιμή ημέρας) (s m^{-1}), r_R : αντίσταση ακτινοβολίας (day m^{-1}).

Στις εξισώσεις έχουν γίνει μικρές προσαρμογές σε σχέση με τις πρωτότυπες εκφράσεις ώστε να ταιριάζουν τα σύμβολα και οι μονάδες με αυτές που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο FAO P-M (Allen κ.α., 1998).

Σε κάθε τμήμα καταγράφονταν οι ακόλουθες κλιματικές παράμετροι:

- θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) και σχετική υγρασία (%) αέρα, μέσω 8 αισθητήρων, ένας για κάθε πάγκο (model H08-032-08, HOBO instruments, MA),
- ολική ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό (W m^{-2}), (πυρανόμετρα model SKS 1110, Skye instruments, UK),
- θερμοκρασία φύλλων ($^{\circ}\text{C}$), με θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης (type T, διάμετρος αισθητήρα 1 mm, Omega Engineering, Manchester, U.K.) τα οποία ήταν στερεωμένα στην κάτω επιφάνεια των φύλλων,
- διαπνοή, μέσω δύο λυσιμετρικών ζυγών (model 60000 G SCS, Presica, Switzerland), καθένας από τους οποίους έφερε 3 φυτά σε ειδική κατασκευή.

Η απώλεια βάρους που κατέγραφαν οι ζυγοί θεωρήθηκε ίση με τη απώλεια νερού μέσω διαπνοής από τα φυτά. Παράλληλα γινόταν καταγραφή του όγκου νερού (I) που εκνεφωνόταν από τις δύο μονάδες υδρονέφωσης (παροχόμετρο model DN 25, Actaris, France), της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, καθώς και της σχετικής υγρασίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου. Όλες οι μετρήσεις (εκτός από αυτές των HOBO) συλλέγονταν σε data logger (model DL3000, Delta-T devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις γίνονταν ανά 30 s και καταγράφονταν οι μέσοι όροι δεκαλέπτου.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας εκτιμήθηκε μέσω καταστροφικών μετρήσεων ολόκληρων φυτών, των οποίων τα φύλλα σαρώθηκαν σε scanner. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν τρεις φορές: στις 9 Αυγούστου, στις 26 Σεπτεμβρίου και στις 22 Νοεμβρίου και η αντίστοιχη τιμή του LAI βρέθηκε ίση με 1,90, 4,30 και 3,20 για το τμήμα με σύστημα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη (Fog) και 2,10, 3,40 και 2,20 για το τμήμα Control.

Όσον αφορά την ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο των φυτών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, επειδή δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις επιλέχθηκε η τιμή $0,5 \text{ m s}^{-1}$ μετά από αναζήτηση στη σχετική βιβλιογραφία (για παρόμοιες κατασκευές και καλλιέργειες βρέθηκαν: $0,10\text{-}0,50 \text{ m s}^{-1}$ (Khaoua κ.α., 2006), $0,30 \text{ m s}^{-1}$ (Molina-Aiz, 2004), $0,12\text{-}0,18 \text{ m s}^{-1}$ (Atarassi κ.α., 2006), όμως η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση των $0,50 \text{ m s}^{-1}$ όταν χρησιμοποιείται στην εξίσωση υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (Allen κ.α., 1998) ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις της αστάθειας του οριακού στρώματος και η άνωση του αέρα όσον αφορά την υποβοήθηση της ανταλλαγής υδρατμών στην επιφάνεια όταν υπάρχει νηνεμία. Θέτοντας τον περιορισμό αυτό ως προς την ταχύτητα ανέμου για την εξίσωση της ET βελτιώνεται η ακρίβεια εκτίμησης υπό συνθήκες πολύ χαμηλής ταχύτητας ανέμου (συνηθισμένη κατάσταση στο θερμοκήπιο).

Η ροή θερμότητας προς το έδαφος (G) μπορεί -σε περιπτώσεις που η περίοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής είναι ίση ή μεγαλύτερη της ημέρας- να θεωρηθεί πρακτικά αμελητέα (Allen κ.α., 1998; Prenger κ.α., 2002).

Σχετικά με τη λευκαύγεια (α , albedo), το συντελεστή αντίστασης επιφάνειας και τον αεροδυναμικό συντελεστή αντίστασης στη μεταφορά υδρατμών που είναι απαραίτητα δεδομένα για τον άμεσο υπολογισμό με βάση το μοντέλο Stanghellini (Stanghellini, 1987; Prenger κ.α., 2002) αναζητήθηκαν δεδομένα στη βιβλιογραφία και έγιναν έμμεσοι υπολογισμοί. Για τη λευκαύγεια η μέση ημερήσια τιμή για τη θερινή περίοδο θεωρήθηκε ίση με 0,25 για καλλιέργεια πιπεριάς σε θερμοκήπιο (τμήμα Control) (Al-Riahi κ.α., 1989; Hasson, 1990; Nederhoff και Vegter, 1994), ενώ για τη τμήμα Fog, λόγω του ότι για μεγάλο διάστημα της ημέρας τα φύλλα ήταν βρεγμένα, επιλέχθηκε τιμή ίση με 0,15 (Κουτσογιάννης, 2004). Για τη στοματική και την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, δεν βρέθηκαν αναφορές στη βιβλιογραφία για καλλιέργεια πιπεριάς. Γενικά, υπάρχει μεγάλη έλλειψη καλά τεκμηριωμένης πληροφορίας σχετικά με τους συντελεστές αυτούς (Allen κ.α., 1998). Έτσι, έγινε εκτίμησή τους από βιβλιογραφικές πηγές (Lhommea, 2004; Katerji και Rana, 2006) και από έμμεσο υπολογισμό τους (Katsoulas κ.α., 2002; Atarassi κ.α., 2006). Οι μέσες ημερήσιες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $ra=100$ και 150 s m^{-1} για τα τμήματα Control και Fog αντίστοιχα και $rc=200 \text{ s m}^{-1}$ και για τα δύο τμήματα.

Τέλος, όσον αφορά τους φυτικούς συντελεστές που απαιτούνται για τον υπολογισμό με βάση το μοντέλο FAO P-M (Allen κ.α., 1998) χρησιμοποιήθηκαν αυτοί που αναφέρονται από τους Orgaz κ.α. (2005) για πιπεριά θερμοκηπίου σε μεσογειακές συνθήκες ($Kc_{ini}=0,2$: 0-30 ημέρες, $Kc_{mid}=1,3$: 60-125 ημέρες και $Kc_{end}=0,9$: 180 ημέρες).

Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει μία εικόνα του μικροκλίματος που επικρατούσε στο θερμοκήπιο κατά την περίοδο των μετρήσεων. Στην Εικόνα 35 παρουσιάζονται οι μετρημένες τιμές σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν μέσω των δύο προσεγγίσεων για 20 ομοιόμορφα κατανεμημένες ημέρες κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Είναι φανερό ότι και για τα δύο τμήματα το μοντέλο Stanghellini κατά κανόνα υπερεκτιμά την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ενώ το αντίθετο συμβαίνει με το μοντέλο Penman-Monteith με φυτικούς συντελεστές που προτείνονται από τους Orgaz κ.α. (2005). Η μέση τιμή των απολύτων διαφορών και για τα δύο μοντέλα και για τα δύο τμήματα είναι ίση με $0,30 \text{ mm day}^{-1}$.

Πίνακας 3 Μέσες τιμές (για την περίοδο της ημέρας 10:00-18:00) ενδεικτικών παραμέτρων του κλίματος στο θερμοκήπιο κατά την περίοδο των μετρήσεων.

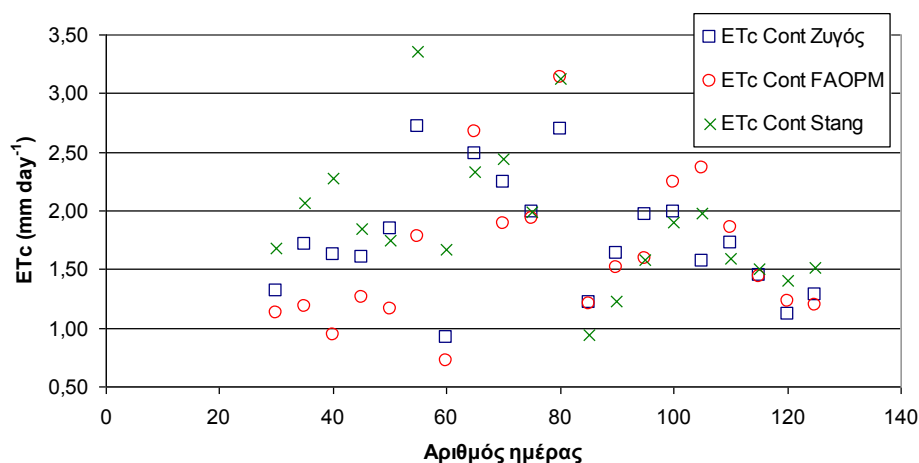
	T		T _c		e _s -e _a	
	°C		°C		kPa	
Τμήμα \ Περίοδος	Fog	Control	Fog	Control	Fog	Control
Ιούλιος	29,1	32,4	26,7	29,0	1,1	2,5
Αύγουστος	28,0	30,0	25,9	27,2	1,2	1,9
Σεπτέμβριος	26,3	29,6	25,0	26,7	1,0	1,9
Οκτώβριος	24,1	28,2	24,3	25,5	1,0	1,8

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 36, για το τμήμα Control οι τιμές του R² ήταν 0,5626 και 0,6488 για τα μοντέλα FAO PM και Stanghellini αντίστοιχα, ενώ για το τμήμα Fog οι αντίστοιχες τιμές ήταν 0,7489 και 0,6273. Όσο αφορά το συντελεστή συσχέτισης (κλίση της ευθείας της γραμμικής παρεμβολής) για το τμήμα Control είχε τιμή 0,9233 και 1,0774 για τα μοντέλα FAO PM και Stanghellini αντίστοιχα, ενώ για το τμήμα Fog οι αντίστοιχες τιμές ήταν σε 0,7904 και 1,0100.

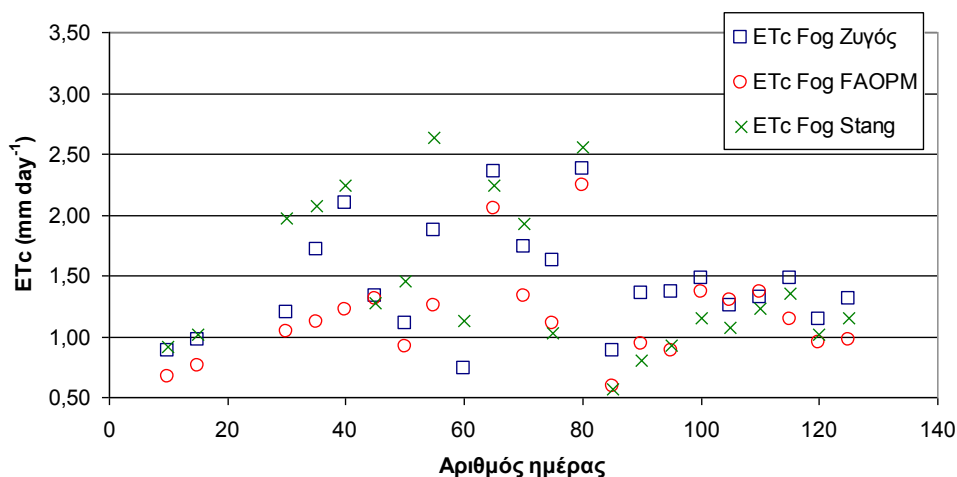
Το μοντέλο Stanghellini φαίνεται να επιτυγχάνει καλύτερη πρόβλεψη της εξατμισοδιαπνοής και στα δύο τμήματα (όπως φαίνεται από τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης). Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί αναμενόμενο μια και το

μοντέλο Stanghellini έχει αναπτυχθεί με σκοπό την προσαρμογή της σχέσης Penman-Monteith στο μικροκλίμα του εσωτερικού του θερμοκηπίου (Stanghellini, 1987; Prenger κ.α., 2002; Mpusia, 2006; Donatelli κ.α., 2006).

Σε κάθε περίπτωση, η αδυναμία και των δύο προσεγγίσεων να εκτιμήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά δεδομένα μπορεί να αποδοθεί στη δυσκολία καθορισμού φυτικών συντελεστών με γενική ισχύ για όλες τις περιπτώσεις θερμοκηπιακής καλλιέργειας πιπεριάς καθώς και της αντικειμενικής αδυναμίας ακριβούς προσδιορισμού των συντελεστών αντίστασης στη μεταφορά υδρατμών.

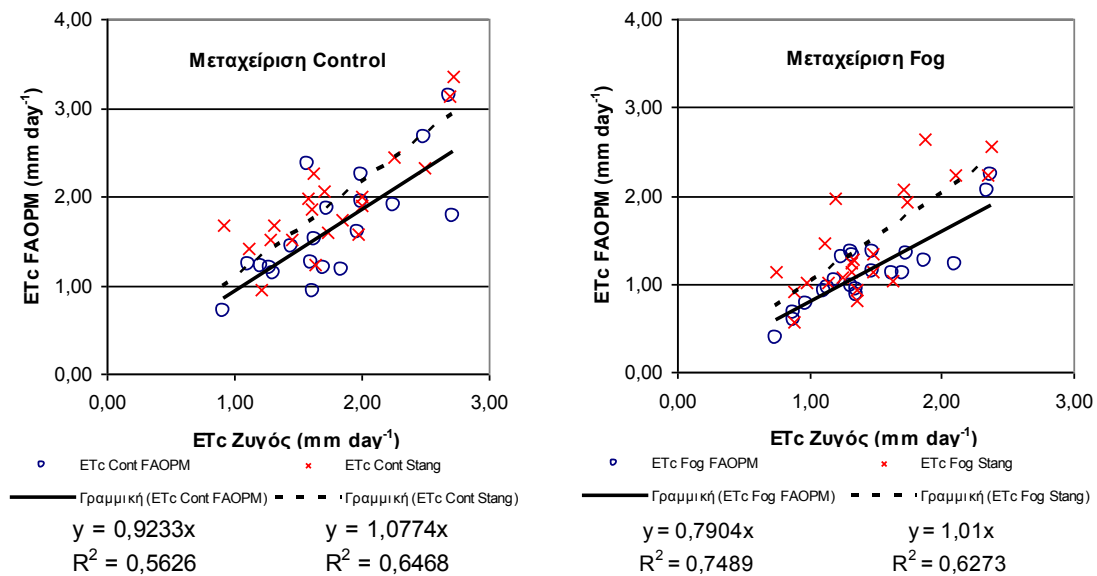


Control



Fog

Εικόνα 35 Τιμές ETc που μετρήθηκαν με τους λυσιμετρικούς ζυγούς (□) στα δύο τμήματα σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο FAO PM (ο) και το μοντέλο Stanghellini (x).



Εικόνα 36 Μετρημένη ETc (ημερήσια) σε σχέση με τα δύο μοντέλα υπολογισμού για τα δύο τμήματα

Είναι προφανές ότι υπάρχει ανάγκη τροποποίησης των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κατανάλωσης νερού σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες πιπεριάς, ώστε αυτές να προσαρμοστούν στις μεσογειακές συνθήκες, με ιδιαίτερη έμφαση στον υπολογισμό των συντελεστών αεροδυναμικής και επιφανειακής αντίστασης. Σε κάθε περίπτωση όμως, και τα δύο μοντέλα δίνουν την δυνατότητα μίας καλής πρώτης προσέγγισης των υδατικών αναγκών μίας καλλιέργειας πιπεριάς στο θερμοκήπιο. Μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό προγραμμάτων άρδευσης, τα οποία έτσι και αλλιώς έχουν ανάγκη προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες καλλιέργειας κατά την εφαρμογή τους στην πράξη.

Κεφάλαιο 5 - Επίδραση του προγράμματος άρδευσης στην ποιότητα και ποσότητα παραγωγής υδροπονικής καλλιέργειας ζέρμπερας – Αρχικές μετρήσεις με σκοπό την αξιολόγηση σχέσης υδατικής κατάστασης και ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια

Εισαγωγή

Σκοπός του πειράματος ήταν η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της συχνότητας και της ποσότητας άρδευσης στην παραγωγή ανθέων ζέρμπερας (*Gerbera jamesonii*) ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη διαχείριση του νερού και παραγωγή. Μέσω ενός συστήματος με πυρανόμετρο, γίνονταν άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου γίνονταν ίσο με 1650 kJm^{-2} [υψηλή συχνότητα άρδευσης - high irrigation frequency (HIF)] ή 3300 kJm^{-2} [χαμηλή συχνότητα άρδευσης - low irrigation frequency (LIF)]. Η ποσότητα του νερού που εφαρμόζονταν σε κάθε αρδευτικό γεγονός ήταν 0,125 mm και 0,250 mm για την HIF και την LIF, αντίστοιχα. Στο πλαίσιο του πειράματος αυτού έγιναν μετρήσεις του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, της εξατμισοδιαπνοής και της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας. Όσο αφορά την παραγωγή, μετρήθηκαν ο αριθμός, το νωπό βάρος, το μήκος και το πάχος των ανθοφόρων βλαστών. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται αφορούν καλλιέργεια 8 μηνών (μετά τη μεταφύτευση) και διήρκεσαν 90 ημέρες (Μάιος – Ιούλιος 2008). Η φυλλική επιφάνεια αλλά και τα βασικά παραγωγικά χαρακτηριστικά δεν επηρεάστηκαν από την συχνότητα άρδευσης. Στο πλαίσιο του πειράματος έγιναν μετρήσεις ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από την φυλλική επιφάνεια με σκοπό την εξοικείωση με τα όργανα και τους τρόπους μέτρησης αλλά και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συσχέτιση αρδευτικών γεγονότων και αλλαγών στην ανακλαστική συμπεριφορά της καλλιέργειας.

Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος

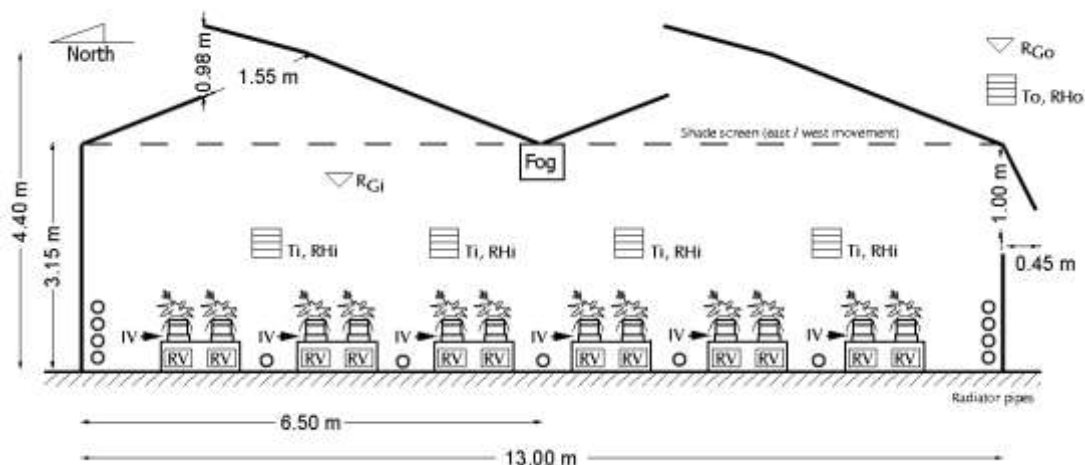
Θερμοκήπιο και φυτικό υλικό

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο γυάλινο θερμοκήπιο AAT του ΤΕΙ Ηπείρου (αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασης και του εξοπλισμού έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο). Χρησιμοποιήθηκε το μεσαίο τμήμα του θερμοκηπίου (12 πάγκοι, 160m²). Τα φυτά ζέρμπερας (*Gerbera jamesonii* cv. Balance®), παραλήφθηκαν από το φυτώριο σε μορφή Jiffy plugs (6 cm), και μεταφυτεύτηκαν την 21 Σεπτεμβρίου 2007 σε γλάστρες των 4-L²⁸ (ένα φυτό ανά γλάστρα) που περιείχαν ελαφρόπετρα. Σε κάθε κανάλι τοποθετήθηκαν 18 γλάστρες, επομένως η συνολική πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,7 φυτά m⁻². Αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ εμπορικές καλλιέργειες ζέρμπερα η πυκνότητα φθάνει ακόμη και τα 10 φυτά m⁻² (Rogers and Tjia, 1990) σε πειραματικές εφαρμογές η πυκνότητα είναι συνήθως αρκετά μικρότερη (Maloupa κ.α., 1993: 3,15 φυτά m⁻²; Papadopoulos κ.α., 1995: 5,1 φυτά m⁻²; Maloupa κ.α., 1996: 2,9 φυτά m⁻²).

Όλα τα κανάλια καλύφθηκαν από ειδικό πλαστικό (μαύρο κάτω, λευκό πάνω) με σκοπό την αποφυγή εξάτμισης από το υπόστρωμα. Την περίοδο των μετρήσεων (Μάιος – Ιούλιος 2008) τα ανοίγματα είχαν ρυθμιστεί ώστε να ανοίγουν όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό ήταν μεγαλύτερη από 22°C (Katsoulas κ.α., 2007).

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ελαφρόπετρα Νισύρου (ΛΑΒΑ ΑΕ), με μέγεθος κόκκων 0-5mm. Τα βασικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος αυτού είναι: φαινόμενη πυκνότητα: 720 kgm⁻³, πορώδες: 72% (Manios κ.α., 1995), και υδατοικανότητα φυτοδοχείου 37,6% (Gizas και Savvas, 2007). Το υπόστρωμα δεν ξεπλύθηκε πριν τη χρήση (Manios κ.α., 1995).

²⁸ Διαστάσεις γλάστρας: D_{επάνω}=20cm, D_{κάτω}=13cm και H=14cm.



Εικόνα 37 Τομή του θερμοκηπίου με σημειωμένα τα όργανα μέτρησης: T, RH = αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα (δείκτες: o= εξωτερική, i= εσωτερική), R_G = πυρανόμετρα (δείκτες: o= εξωτερικό, i= εσωτερικό), RV = συγκέντρωση απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος και IV = μέτρηση όγκου θρεπτικού διαλύματος που παρέχεται σε κάθε πάγκο

Άρδευση: σύστημα, μεταχειρίσεις, κατάρτιση προγραμμάτων

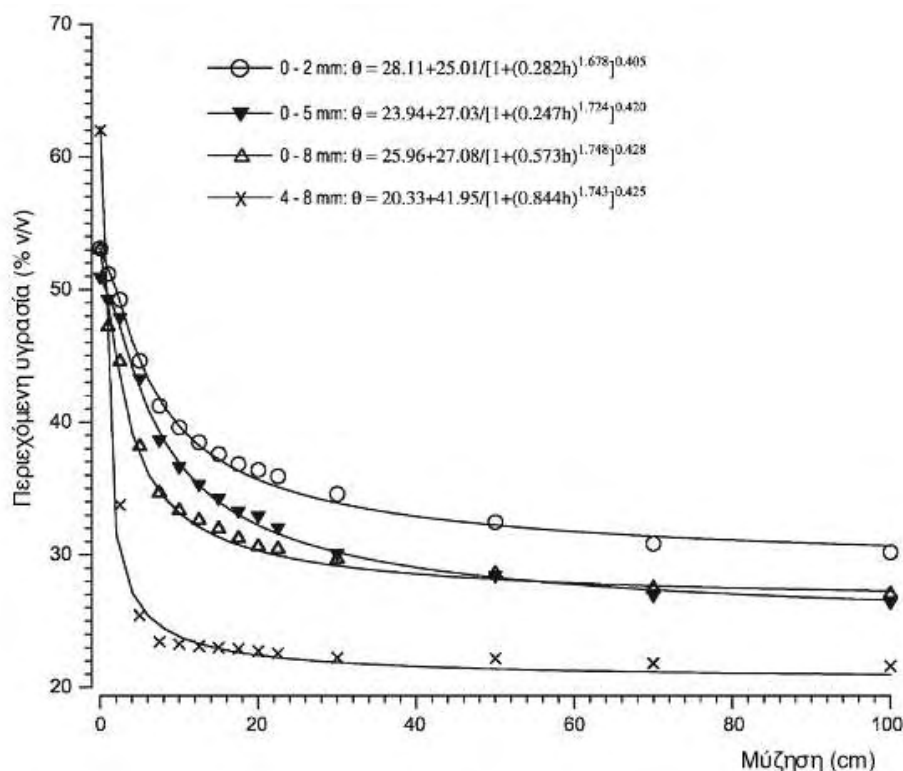
Το θρεπτικό διάλυμα παρέχονταν μέσω ενός συστήματος στάγδην άρδευσης. Σε κάθε γλάστρα ήταν εγκατεστημένοι δύο αυτορυθμιζόμενοι σταλάκτες παροχής 2,2 Lh⁻¹ ο καθένας.

Η τιμή στόχος για το pH και την ηλεκτρική αγωγιμότητα ήταν 5,6 και 1,72 dSm⁻¹, αντίστοιχα. Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος επιλέχθηκε με βάση τα αναφερόμενα από τους Σάββα κ.α. (2001).

Εφαρμόστηκαν 2 πειραματικές μεταχειρίσεις (άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου γίνονταν ίσο με 1650 kJm⁻² [υψηλή συχνότητα άρδευσης - high irrigation frequency (HIF)] ή 3300 kJm⁻² [χαμηλή συχνότητα άρδευσης - low irrigation frequency (LIF)], οι οποίες αντιστοιχούσαν σε 2 διαφορετικές συχνότητες άρδευσης ενώ για κάθε μεταχείριση υπήρχαν 6 επαναλήψεις, τυχαία κατανεμημένες στο χώρο του θερμοκηπίου. Η ποσότητα του νερού που εφαρμόζονταν ήταν 0,125 mm (50 mL/γλάστρα) και 0,250 mm (100 mL/γλάστρα) για την υψηλή (HIF) και την χαμηλή (LIF) συχνότητα άρδευσης αντίστοιχα. Έτσι αφού τα φυτά της μεταχείρισης που αντιστοιχούσαν στην υψηλή συχνότητα άρδευσης δέχονταν διπλάσιο αριθμό αρδευτικών γεγονότων σε σχέση με τη χαμηλή, η συνολική ημερήσια ποσότητα νερού ήταν ίδια για τις δύο μεταχειρίσεις.

Χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία που έχει ήδη αναφερθεί υπολογίστηκαν οι τιμές του ολοκληρώματος της ηλιακής ακτινοβολίας (R_{Go}) που απαιτούνται για την έναρξη άρδευσης και αντιστοιχούν στην HIF (1650 kJm^{-2}) και την LIF 3300 kJm^{-2}):

- Η μέση τιμή του φυτικού συντελεστή, K_c , εκτιμήθηκε ίση με 0,45 (Μαλούρα κ.α., 1993, 1996; Παπαδοπουλος κ.α., 1995; Σάββας κ.α., 2001²⁹) (μικρές μεταβολές του K_c έγιναν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λόγω αλλαγών στην φυλλική επιφάνεια και αναγκών ρύθμισης του ποσοστού απορροής)³⁰. Ο συντελεστής εξάτμισης (α) θεωρήθηκε ίσος με 0,6 όπως παρατηρείται συνήθως σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες (Baille, 1999).
- Κατά την περίοδο των μετρήσεων η κουρτίνα σκίασης ήταν σε χρήση και έτσι ο μέσος συντελεστής περατότητας του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία (τ) ήταν ίσος με 0,41.



Εικόνα 38 Καμπύλες συγκράτησης υγρασίας (σχέση μεταξύ περιεχόμενης υγρασίας και μύζησης που ασκείται από το πορώδες μέσο) για τέσσερις τύπους ελαφρόπετρας (όσο αφορά το μέγεθος κόκκων). Τα σύμβολα αναφέρονται σε μετρημένες τιμές ενώ οι

²⁹ Η εργασία αυτή αφορά μετρήσεις που έγιναν στο ίδιο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε και στο πείραμα αυτό

³⁰ Η ζέρμπερα λόγω της συνεχούς αφαίρεσης γερασμένων ή κατεστραμμένων φύλλων παρουσιάζει μεταβλητότητα όσο αφορά την φυλλική επιφάνεια, γεγονός που προκαλεί επιπλέον δυσκολίες στην προσπάθεια διαμόρφωσης προγράμματος άρδευσης.

καμπύλες στα σχετικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν μέσω μη-γραμμικής ανάλυσης συσχέτισης (Gizas και Savvas, 2007)

Όσο αφορά τη δόση άρδευσης, αυτή εξαρτάται κυρίως από το εύκολα διαθέσιμη υγρασία του υποστρώματος (easily available water - EAW) και καθώς η EAW είναι σχετικά χαμηλή στην ελαφρόπετρα (Gizas and Savvas, 2007³¹) συστήνεται συχνή άρδευση με μικρές δόσεις. Οι Maloupa κ.α. (1996) βρήκαν ότι χαμηλή συχνότητα άρδευσης (περίπου 8 αρδεύσεις ανά ημέρα) είναι ικανοποιητική για υδροπονική καλλιέργεια ζέρμπερας σε διάφορα υποστρώματα. Σε κάθε περίπτωση για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το μέγεθος του φυτοδοχείου (Manios κ.α., 1995; Gizas και Savvas, 2007). Για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης (0,125 mm (50 mL/γλάστρα) και 0,250 mm (100 mL/γλάστρα) για την HIF και την LIF αντίστοιχα) ελήφθησαν υπόψη τα ακόλουθα:

- Από την χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας του υποστρώματος (Εικόνα 38; Gizas και Savvas, 2007), ο όγκος νερού που μπορεί να δοθεί σε κάθε αρδευτικό γεγονός σε μία γλάστρα με 4l ελαφρόπετρα 0-5mm, δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 100 mL ώστε η υγρασία στο υπόστρωμα να μείνει εντός του εύρους του εύκολα διαθέσιμου νερού (easily available water: 10 έως 50 cm).
- Ο συντελεστής ομοιομορφίας (CU) του συστήματος (Christiansen, 1942; ASAE, 1996) υπολογίστηκε ίσως με 92% και επομένως η αποτελεσματικότητα του δικτύου (E_i) εκτιμήθηκε ότι ήταν της τάξης του 90%.
- Το σύστημα υδροπονίας ήταν ανοικτό. Το ποσοστό απορροής (dr) ήταν στο επίπεδο του 40% καθώς στην Ελλάδα είναι συνηθισμένη η χρήση ποσοστών απορροής του επιπέδου αυτού (Maloupa κ.α., 1993). Ακόμη έχει αναφερθεί από τους Akat κ.α. (2009) ότι εφαρμογή διαφορετικών ποσοστών απορροής (από 25 έως 50%) σε καλλιέργεια ζέρμπερας δεν έχει σημαντική επίδραση στην παραγωγή.

Μετρήσεις

Στο πλαίσιο του πειράματος αυτού μετρήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι (Εικόνα 37):

³¹ Σύμφωνα με τους Gizas και Savvas (2007) η υδατοικανότητα φυτοδοχείου είναι της τάξης του 36,90%v/v ή 1291,57ml (θεωρώντας ότι υπάρχουν 3,8l υπόστρωμα σε κάθε γλάστρα), από αυτά 301,24ml, είναι το εύκολα διαθέσιμο νερό, 59,80ml είναι το ρυθμιστικό νερό και 90,17ml το δύσκολα διαθέσιμο νερό.

- θερμοκρασία αέρα (T_i , σε $^{\circ}\text{C}$) και σχετική υγρασία αέρα (RH, σε %) μέσω τεσσάρων αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας ομοιόμορφα κατανεμημένων στο χώρο του θερμοκηπίου και ενός αισθητήρα στο εξωτερικό (HD9008TR, DeltaOhm, Italy). Με βάση τα σχετικά δεδομένα υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές θερμοκρασία, υγρασίας και ελλείμματος πίεσης υδρατμών (Allen κ.α., 1998),
- εξωτερική και εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($R_{G,o}$ και $R_{G,i}$ σε W m^{-2}) μέσω ηλιακών πυρανόμετρων (SKS 1110, Skye instruments, Powys, U.K.) εγκατεστημένων σε ύψος 4,5 m και 2,5m πάνω από το έδαφος αντίστοιχα,
- καθαρή ακτινοβολία (R_n) πάνω από το επίπεδο της καλλιέργειας με χρήση δύο πυραδιόμετρων (LP-NET 07, DeltaOhm, Italy),
- θερμοκρασία φύλλων (T_l) με τη χρήση θερμοζευγών (Copper (PFA 0,01mm)-Constantan (PFA Teflon 0,01mm); OMEGA Engineering, USA), τρία θερμοζεύγη με κοινή σύνδεση για κάθε φυτό σε τυχαία φύλλα 4 φυτών ανά μεταχείριση και
- όγκος νερού άρδευσης (IV) μέσω ψηφιακών μετρητών παροχής (DN 25, Actaris, France)

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις συγκεντρώνονταν σε σύστημα data logger (DL2e Logger, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις γίνονταν κάθε 30 s και καταγράφονταν ο μέσος όρος 10λέπτου.

Ακόμη το σύνολο της απορροής μαζεύονταν ξεχωριστά σε κάθε πάγκο και ο αντίστοιχος όγκος απορροής (RV) μετρούνταν χειρονακτικά κάθε εβδομάδα. Η μέτρηση αυτή σε συνδυασμό με τον όγκο του νερού άρδευσης χρησιμοποιούνταν για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μέσω ισοζυγίου νερού.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (leaf area index, LA : m^2 φύλλου m^{-2} εδάφους) της καλλιέργειας εκτιμήθηκε μέσω σάρωσης (GT 9500, Epson, Nagano, Japan) της επιφάνειας των φύλλων και παράλληλης μέτρησης του μήκους και του πλάτους τους. Χρησιμοποιούνταν τυχαία επιλεγμένα φυτά που καταστρέφονταν και στη θέση τους τοποθετούνταν παρόμοια φυτά από εφεδρική καλλιέργεια. Μετρήσεις φυλλικής επιφάνειας έγιναν τρεις φορές την περίοδο των μετρήσεων και συγκεκριμένα στις 15 Μαΐου, 15 Ιουνίου και 15 Ιουλίου. Για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας γινόταν αριθμητική ολοκλήρωση με τη μέθοδο Monte-Carlo (Robert and Casella, 2005) των εικόνων των φύλλων.

Οι ταξιανθίες θεωρούνταν ώριμες όταν ήταν ορατά τουλάχιστον 2 πλήρη στεφάνια ώριμων αρσενικών ανθέων. Η συγκομιδή γινόταν νωρίς το πρωί σε εβδομαδιαία βάση. Οι μετρήσεις παραγωγής αφορούσαν τον αριθμό, το νωπό βάρος (με τη χρήση ζυγού ακριβείας 60000 G SCS, Precisa Gravimetrics AG, Dietikon,

Switzerland), πάχος βλαστού (με χρήση ηλεκτρονικού μικρόμετρου) σε δύο κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις, μήκος βλαστού και διάμετρο ταξιανθίας.

Τέλος, 6 ημέρες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων έγιναν μετρήσεις για τη συσχέτιση της υδατικής κατάστασης των φυτών και της ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από αυτά. Από τις μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται επιλεγμένα αποτελέσματα. Κατά τις ημέρες των μετρήσεων αυτών γινόταν μέτρηση των ακόλουθων παραμέτρων:

- Στοματική αντίσταση φύλλων (stomatal resistance – r_s) με χρήση πορόμετρων (LI-1600M, LICOR Inc., Lincoln, NE, USA και AP4, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), οι μετρήσεις γίνονταν χειρονακτικά με συχνότητα 15min.
- Εξαμυριοδιαπνοή με χρήση δύο λυσιμετρικών ζυγών, ένας για κάθε μεταχείριση (60000 G SCS, Precisa Gravimetrics AG, Dietikon, Switzerland). Οι μετρήσεις γίνονταν κάθε 30 s και καταγράφονταν στο data logger ο μέσος όρος 10λέπτου.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της καλλιέργειας (R_R) μέσω φορητού πολυφασματικού ραδιόμετρου (MSR87, CropScan Inc., Rochester, USA) σε 8 στενές φασματικές λωρίδες κεντραρισμένες στα ακόλουθα μήκη κύματος (σε nm): 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810. Η μετρήσεις γίνονταν χειρονακτικά με συχνότητα 15min. Το ραδιόμετρο τοποθετούνταν σε ύψος 1,5m πάνω από την φυλλική επιφάνεια (η επιφάνεια του δείγματος, σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή ήταν 0,44 m²). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η κουρτίνα σκίασης ήταν μαζεμένη ενώ για την απομάκρυνση -κατά την επεξεργασία των μετρήσεων- θορύβων λόγω σκιάσεων κάθε μέτρηση πάνω από την φυλλική επιφάνεια συνοδευόταν από μέτρηση πάνω από λευκή επιφάνεια (η διαδικασία έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά).

Τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση της ανακλώμενης ακτινοβολίας με την υδατική κατάσταση των φυτών. Έγινε έλεγχος σε μία σειρά από δείκτες που ήταν δυνατόν να υπολογιστούν και τελικά η καλύτερη απόκριση παρατηρήθηκε για ένα δείκτη (θα αναφέρεται στην συνέχεια ως sPRI) με μορφή ανάλογη με αυτή του Physiological Reflectance Index (PRI).

Στο πείραμα αυτό δεν έγινε καταγραφή της υγρασίας υποστρώματος λόγω των δυσκολιών που υπάρχουν σχετικά με την συνεχή μέτρηση υγρασίας σε υποστρώματα υδροπονίας. Είναι γνωστό ότι 1% αλλαγή στην περιεχόμενη στο υπόστρωμα υγρασία μπορεί να επιφέρει μεταβολή πάνω από 1kPa στη μύζηση υποστρώματος και οι διαθέσιμοι αισθητήρες δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι ώστε να καταγράφουν με αξιοπιστία τις σχετικές μεταβολές. Την περίοδο του πειράματος

δοκιμάστηκαν ορισμένοι αισθητήρες συνεχούς καταγραφής (HS10, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA και ThetaProbe, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), αλλά τα πρώτα αποτελέσματα δεν ήταν αξιοποιήσιμα.

Τα δεδομένα αναλύθηκαν και η σύγκριση των μέσων έγινε με εφαρμογή του t-Student test σε επίπεδο 95% χρησιμοποιώντας το στατιστικό λογισμικό PlotIT (Scientific Programming Enterprises, USA). Για να καλυφθεί η ανάγκη ανάλυσης χρονοσειρών (time series) χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό λογισμικό SPSS 17.

Αποτελέσματα και συζήτηση

Μικροκλίμα θερμοκηπίου

Οι μέσες τιμές των κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό και το εξωτερικό του θερμοκηπίου (μέσοι όροι για την περίοδο της ημέρας από 08:00 – 19:00) κατά την περίοδο των μετρήσεων παρουσιάζονται στην συνέχεια (Πίνακας 4).

Πίνακας 4 Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό και το εξωτερικό του θερμοκηπίου κατά την περίοδο μετρήσεων. Η τυπική απόκλιση των τιμών δίνεται στις παρενθέσεις.

Περίοδος	T_i^z °C	RH_i^y %	VPD^x kPa	R_{Gi}^w W m ⁻²	T_a^v °C	R_{Go}^u W m ⁻²
Μάιος	31.6 (±6.3)	53.2 (±12.4)	2.6 (±0.6)	272 (±175)	24.8 (±4.1)	639 (±299)
Ιούνιος	37.4 (±7.1)	49.9 (±13.2)	3.2 (±0.5)	274 (±170)	29.9 (±4.6)	669 (±294)
Ιούλιος	38.8 (±6.4)	50.6 (±12.0)	2.8 (±0.6)	288 (±177)	31.6 (±3.6)	673 (±287)

^z T_i : θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό

^y RH_i : σχετική υγρασία αέρα στο εσωτερικό

^x VPD : έλλειμμα πίεσης υδρατμών στο εσωτερικό

^w R_{Gi} : ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό

^v T_a : θερμοκρασία αέρα στο εξωτερικό

^u R_{Go} : ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό

Δείκτης φυλλικής επιφάνειας

Απλές γραμμικές σχέσεις για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας καλλιέργειας ζέρμπερας έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές (για παράδειγμα: $S = 6,166 + 0,308 \cdot L \cdot W$, Maloupa κ.α., 1996) αλλά δεν ταίριαζαν με τα δεδομένα του συγκεκριμένου πειράματος, πιθανότατα λόγω της διαφορετικής ποικιλίας.

Πίνακας 5 Δείκτης φυλλικής επιφάνειας (I_{LA}) της καλλιέργειας για τις μεταχειρίσεις HIF και LIF. Η τυπική απόκλιση των τιμών δίνεται στις παρενθέσεις.

Ημερομηνία	HIF	LIF
15/5/2008	0.41 (± 0.10)	0.37 (± 0.08)
15/6/2008	0.49 (± 0.09)	0.45 (± 0.11)
15/7/2008	0.44 (± 0.12)	0.42 (± 0.11)
Μέση τιμή	0.45 (± 0.10)	0.41 (± 0.10)

Η ανάλυση (γραμμική παλινδρόμηση) των δεδομένων έδωσε καλή συσχέτιση ($R^2=0,83$) μεταξύ της φυλλικής επιφάνειας (S , cm^2) και του γινομένου μήκους x πλάτος ($L \times W$ σε cm) των φύλλων και για τις δύο μεταχειρίσεις.

$$S = 0,57 L \cdot W$$

Εξίσωση 20 Εκτίμηση επιφάνειας φύλλου ζέρμπερας

Ακόμη αναπτύχθηκε μία απλούστερη και πιο εύκολα εφαρμόσιμη σχέση για τον υπολογισμό του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (I_{LA}) βασίζεται στον αριθμό των φύλλων ανά φυτό (n) και την πυκνότητα φύτευσης (p). Η σχέση ισχύει και για τις δύο μεταχειρίσεις και έχει πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης ($R^2 = 0,84$).

$$I_{LA} = 0.0083 n p$$

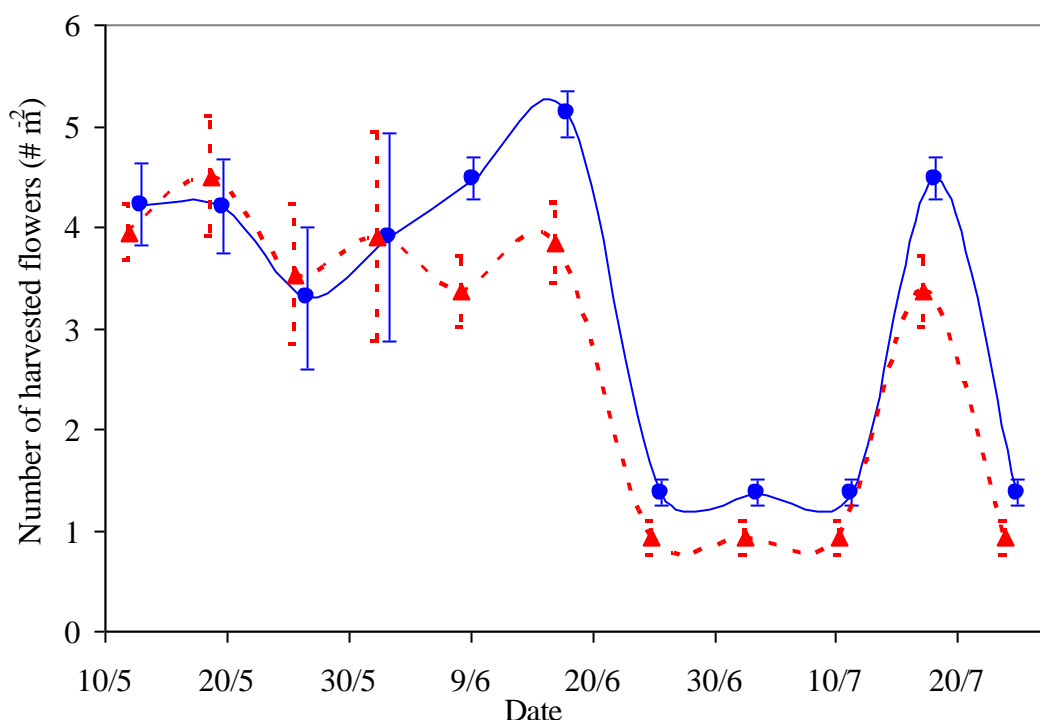
Εξίσωση 21 Εκτίμηση δείκτη φυλλικής επιφάνειας ζέρμπερας

Ο συνολικός μέσος αριθμός φύλλων ανά φυτό και για τις δύο μεταχειρίσεις βρέθηκε ίσος με 16,78 (με τυπική απόκλιση $\pm 5,61$ φύλλα). Η μέση τιμή του I_{LA} ήταν 0,45 ($\pm 0,1$) και 0,41 ($\pm 0,1$), για την μεταχείριση HIF και LIF αντίστοιχα (10% υψηλότερες τιμές I_{LA} στην HIF σε σχέση με την LIF). Όμως οι διαφορές δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Οι μεταβολές της τιμής του I_{LA} κατά την περίοδο των μετρήσεων (Πίνακας 5) οφείλονται στη συνεχή απομάκρυνση γερασμένων και κατεστραμμένων φύλλων (Rogers και Tjia, 1990; Katsoulas κ.α., 2006).

Παραγωγή δρεπτών ανθέων (ποσότητα και ποιότητα)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 39, υπήρχε μία μεταβολή στην παραγωγή ανθέων κατά την περίοδο των μετρήσεων με τη μεταχείριση LIF να δίνει σταθερά περισσότερα άνθη. Παρόλα αυτά η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Η μείωση του αριθμού ανθέων την περίοδο από τέλος Ιουνίου έως αρχές Ιουλίου σχετίζεται πιθανότατα με τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που

παρατηρήθηκαν τότε (πάνω από 38°C), που οδήγησε σε μείωση της ανάπτυξης και της ανθοφορίας (σύμφωνα με τους Rogers και Tjia (1990), το βέλτιστο θερμοκρασιακό εύρος για την παραγωγή ανθέων ζέρμπερας είναι από 17 έως 27°C). Ο συνολικός αριθμός ανθέων ανά m² καλλιέργειας για την περίοδο των 3 μηνών ήταν 35,20 για την μεταχείριση LIF και 30,12 για την HIF (η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων).

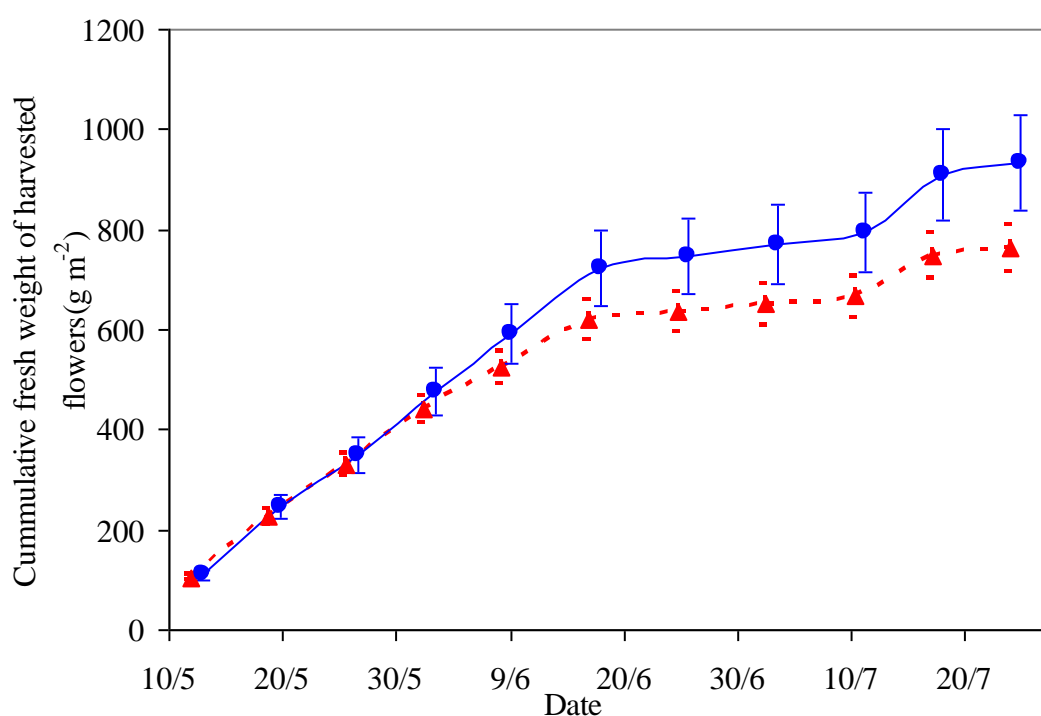


Εικόνα 39 Εξέλιξη του αριθμού ανθέων που συγκομίστηκαν ανά m² θερμοκηπίου; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν ± τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)

Όσο αφορά το νωπό βάρος ανά άνθος, υπήρχε παρόμοια τάση και για τις δύο μεταχειρίσεις και η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Η μέση τιμή του νωπού βάρους (gr / άνθος) ήταν 22,9 (± 5,1) για την μεταχείριση HIF και 24,4 (± 6,2) για την LIF. Σε κάθε περίπτωση η εξέλιξη του αθροιστικού νωπού βάρους των ανθέων που συγκομίστηκαν ανά μονάδα επιφάνειας θερμοκηπίου (Εικόνα 40) ακολούθησε παρόμοια τάση και για τις δύο μεταχειρίσεις με τις τιμές που αντιστοιχούσαν στην μεταχείριση LIF να είναι πάντα υψηλότερη από αυτή της HIF. Οι σχετικές αθροιστικές τιμές για περίοδο 3 μηνών ήταν 933,94 gm⁻² και 764,27 g m⁻² για την LIF και την HIF, αντίστοιχα (22% περισσότερο νωπό βάρος για τα φυτά της LIF).

Το μήκος του μίσχου και η διάμετρος του άνθους είναι τα βασικά χαρακτηριστικά για την εμπορία της ζέρμπερας ως δρεπτού άνθους. Τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά

της ποικιλίας cv. Balance που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρούσα μελέτη είναι: μήκος μίσχου 60 cm και διάμετρος άνθους μεταξύ 10 και 12 cm (Ανώνυμος, 2007). Η Εικόνα 41 παρουσιάζει την εξέλιξη του μέσου μήκους μίσχου κατά την περίοδο των μετρήσεων. Το μέσο μήκος μίσχου ήταν 59 cm (± 7 cm) και για τις δύο μεταχειρίσεις (η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε σημαντικές διαφορές). Υπό την μεταχείριση LIF, τα φυτά ζέρμπερα παρήγαγαν ελαφρώς μεγαλύτερα άνθη σε σχέση με την HIF (Εικόνα 42), αλλά και πάλι δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων. Η μέση διάμετρος ανθέων ήταν 11,5 cm (± 1) και 12cm (± 1) για τις μεταχειρίσεις HIF και LIF αντίστοιχα.

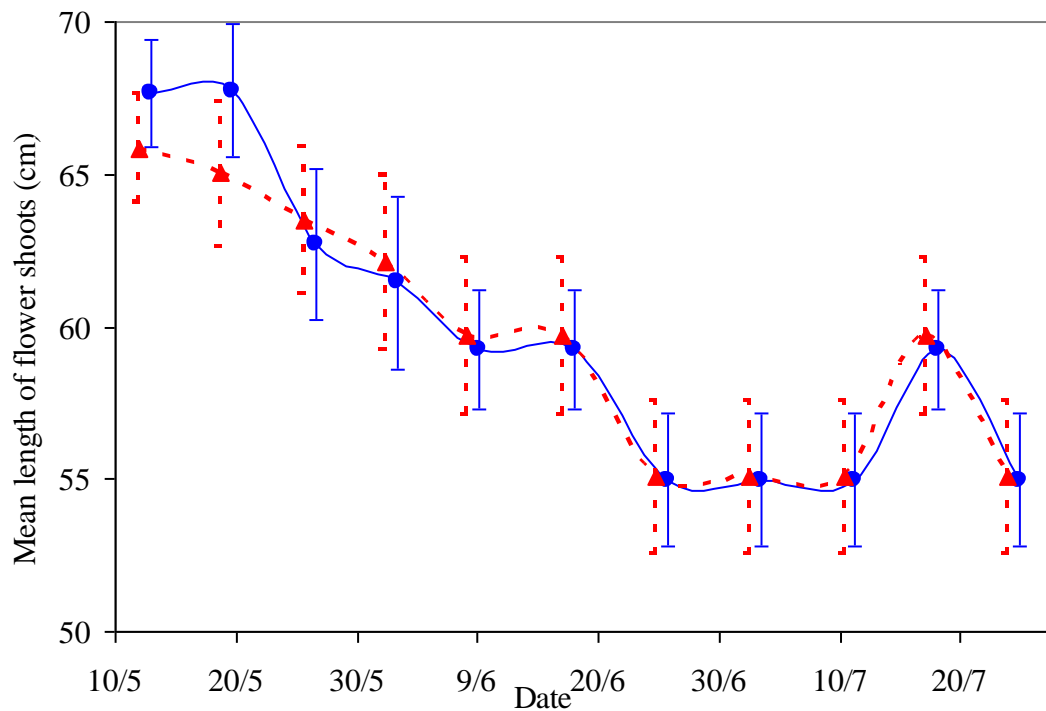


Εικόνα 40 Εξέλιξη του αθροιστικού νωπού βάρους των ανθέων που συγκομίστηκαν ανά m² θερμοκηπίου; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν \pm τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)

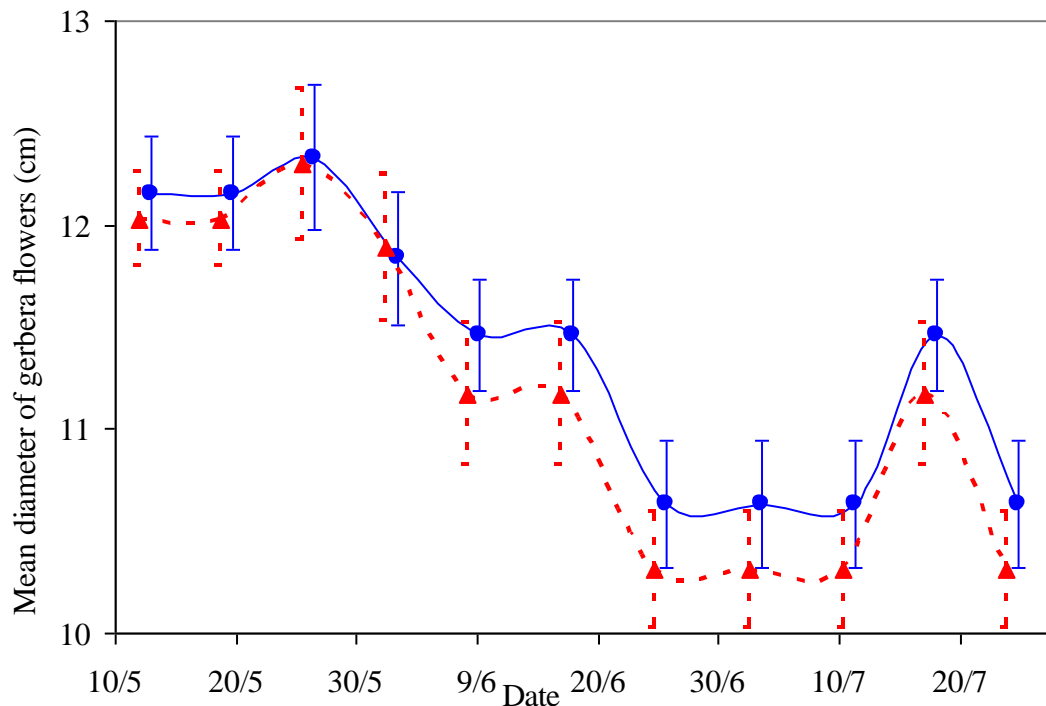
Σύμφωνα με τους Rogers και Tjia (1990), τα φυτά ζέρμπερας απαιτούν σχεδόν συνεχή εφοδιασμό με νερό, αλλά από την άλλη η επιφάνεια του υποστρώματος πρέπει να στεγνώνει μεταξύ των αρδευτικών γεγονότων³². Με βάση την πληροφορία αυτή, η πρακτικά συνεχώς υγρή επιφάνεια υποστρώματος που υπήρχε στην μεταχείριση HIF και η πιθανότητα ο συνδυασμός ελαφρόπετρας κοκκομετρίας 0-5

³² Στο πλαίσιο αξιολόγησης της πληροφορίας αυτής θα είχε ενδιαφέρον η σύγκριση επίγειας και υπόγειας στάγδην άρδευσης σε καλλιέργεια ζέρμπερας.

mm και HIF να μην δημιουργούσε συνθήκες καλού αερισμού του ριζικού συστήματος (Sonneveld, 1989; Schroder και Lieth, 2002), είναι δυνατό να επέδρασε αρνητικά (αλλά σε κάθε περίπτωση όχι σε στατιστικά σημαντικό επίπεδο) στην παραγωγή της ζέρμπερας.



Εικόνα 41 Εξέλιξη του μέσου μήκους μίσχου των ανθέων που συγκομίστηκαν; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν \pm τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)



Εικόνα 42 Εξέλιξη της μέσης διαμέτρου άνθους κατά την περίοδο μετρήσεων; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν \pm τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)

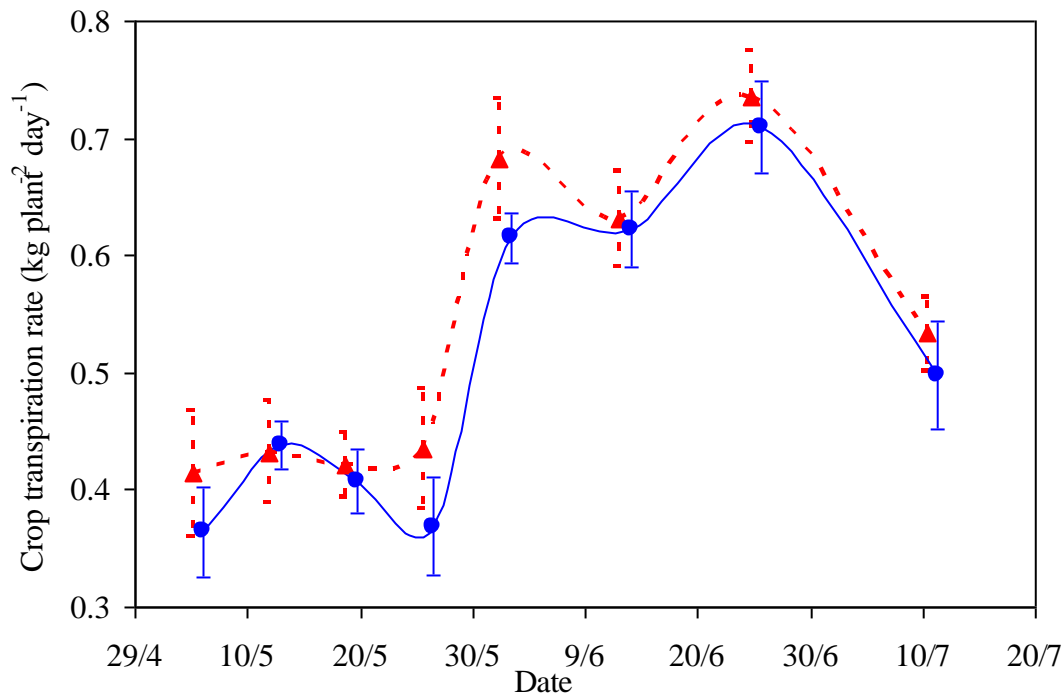
Διαπνοή καλλιέργειας και κατανάλωση νερού

Ο ρυθμός διαπνοής (Tr, σε kg/plant/day) εκτιμήθηκε μέσω μετρήσεων του όγκου νερού που παρέχονταν στα φυτά (IV) και του όγκου νερού που συγκεντρώνονταν από την απορροή (RV). Οι μετρήσεις γίνονταν σε εβδομαδιαία βάση και σε ένα μοντέλο απλοποιημένου ισοζυγίου νερού (Papadopoulos κ.α., 1995; Maloupa κ.α., 1996):

$$Tr = (IV - RV \pm \Delta SM) / n$$

Εξίσωση 22 Υδατικό ισοζύγιο μάζας

όπου ΔSM είναι η διαφορά της υγρασίας υποστρώματος μεταξύ των μετρήσεων και n ο αριθμός των ημερών ανά τις οποίες γινόντουσαν οι μετρήσεις IV και RV. Λόγω του ότι οι μετρήσεις γίνονταν ανά 7 ημέρες η διαφορά στην υγρασία υποστρώματος μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες του ισοζυγίου (Allen κ.α., 1998; Papadopoulos κ.α. 1995). Οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης από το υπόστρωμα αλλά και αυτές που μπορεί να συμβαίνουν λόγω τεχνικών αστοχιών του συστήματος θεωρήθηκαν επίσης αμελητέες.



Εικόνα 43 Εξέλιξη της διαπνοής της καλλιέργειας κατά την περίοδο μετρήσεων; κύκλοι: LIF; τρίγωνα: HIF (οι κατακόρυφες γραμμές εκφράζουν \pm τυπικό σφάλμα των 6 επαναλήψεων)

Οι τιμές της διαπνοής της καλλιέργειας (ουσιαστικά η κατανάλωση νερού από αυτή) όπως υπολογίστηκαν, ήταν παρόμοιες (δεν υπήρχε στατιστικά σημαντική διαφορά) και για τις δύο μεταχειρίσεις (Εικόνα 43).

Η κατανάλωση νερού για την καλλιέργεια κατά την περίοδο των μετρήσεων (Μάιος-Ιούλιος) κυμάνθηκε μεταξύ 0,35 και 0,70 kg φυτό⁻¹ day⁻¹ για την μεταχείριση LIF και HIF αντίστοιχα. Ο μέσος αριθμός των αρδευτικών γεγονότων ανά ημέρα ήταν 10 και 20 για την μεταχείριση LIF και HIF αντίστοιχα. Η μέση τιμή του νερού που παρέχονταν στην καλλιέργεια ήταν 2,40 kg m⁻² d⁻¹ (0,96 kg φυτό⁻¹ day⁻¹), ενώ οι αντίστοιχες ανάγκες σε νερό (δεδομένα διαπνοής) ήταν 1,53 kg m⁻² d⁻¹ (0,61 kg/φυτό/ημέρα). Παρόμοιες τιμές διαπνοής καλλιέργειας ζέρμπερας υπό κάλυψη στην περιοχή της Μεσογείου κατά την θερινή περίοδο έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές (Σάββας κ.α., 2001).

Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού

Η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (water use efficiency - WUE) ορίζεται τυπικά ως το πηλίκο της παραγωγής προς την ποσότητα νερού που χρησιμοποιήθηκε για την άρδευση (Burt κ.α., 1997). Η παραγωγή μπορεί να εκφραστεί με όρους βάρους (νωπού ή ξηρού) ή με αριθμό ανθέων (Bastug κ.α., 2006). Οι σχετικές τιμές που

παρατηρήθηκαν κατά τις δύο υπό μελέτη μεταχειρίσεις ήταν 5,87 και 7,64 g νωπού βάρους (μίσχος + άνθος) ανά λίτρο νερού άρδευσης για την HIF και την LIF αντίστοιχα. Σε όρους αριθμού ανθέων οι αντίστοιχες τιμές ήταν 0,23 και 0,29 άνθη ανά λίτρο νερού. Επομένως για την παραγωγή ενός εμπορικά αξιοποιήσιμου άνθους ζέρμπερας χρειάζονταν 4,32 και 3,47 λίτρα νερού για τις μεταχειρίσεις HIF και LIF αντίστοιχα.

Υδατική κατάσταση φυτών και σχετικοί φασματικοί δείκτες

Είναι γνωστό ότι μείωση της εξατμισοδιαπνοής προκαλεί ελάττωση της δυνατότητας ψύχρανσης της φυλλικής επιφάνειας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία της. Έτσι η διαφορά θερμοκρασίας αέρα και επιφάνειας σχετίζεται με την υδατική κατάσταση του φυτού (Jackson κ.α., 1981). Στην Εικόνα 44 παρουσιάζεται η εξέλιξη της διαφορά θερμοκρασίας φυλλικής επιφάνειας – αέρα για τις δύο μεταχειρίσεις άρδευσης κατά τη διάρκεια μίας επιλεγμένης ημέρας (16 Ιουνίου).

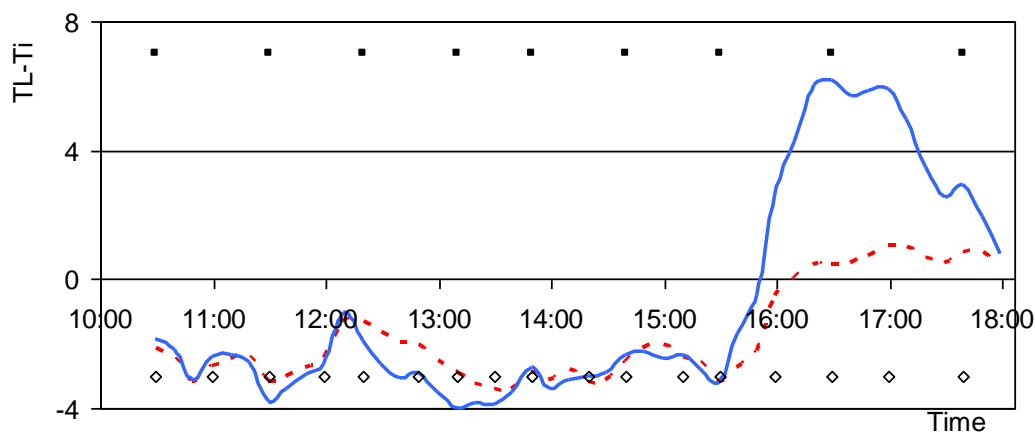
Στο πλαίσιο του πειράματος έγινε μία πρώτη προσπάθεια για την αξιολόγηση επιλεγμένων φασματικών δεικτών ανάκλασης με βάση μετρήσεις από πολυφασματικό ραδιόμετρο. Έγινε έλεγχος σε μία σειρά από δείκτες που ήταν δυνατόν να υπολογιστούν και τελικά η καλύτερη απόκριση παρατηρήθηκε για ένα δείκτη (θα αναφέρεται στην συνέχεια ως Reflectance Index - sPRI) με μορφή ανάλογη με αυτή του Physiological Reflectance Index (PRI):

$$sPRI = R_{560} - R_{510} / R_{560} + R_{510}$$

Εξίσωση 23 Φασματικός δείκτης sPRI

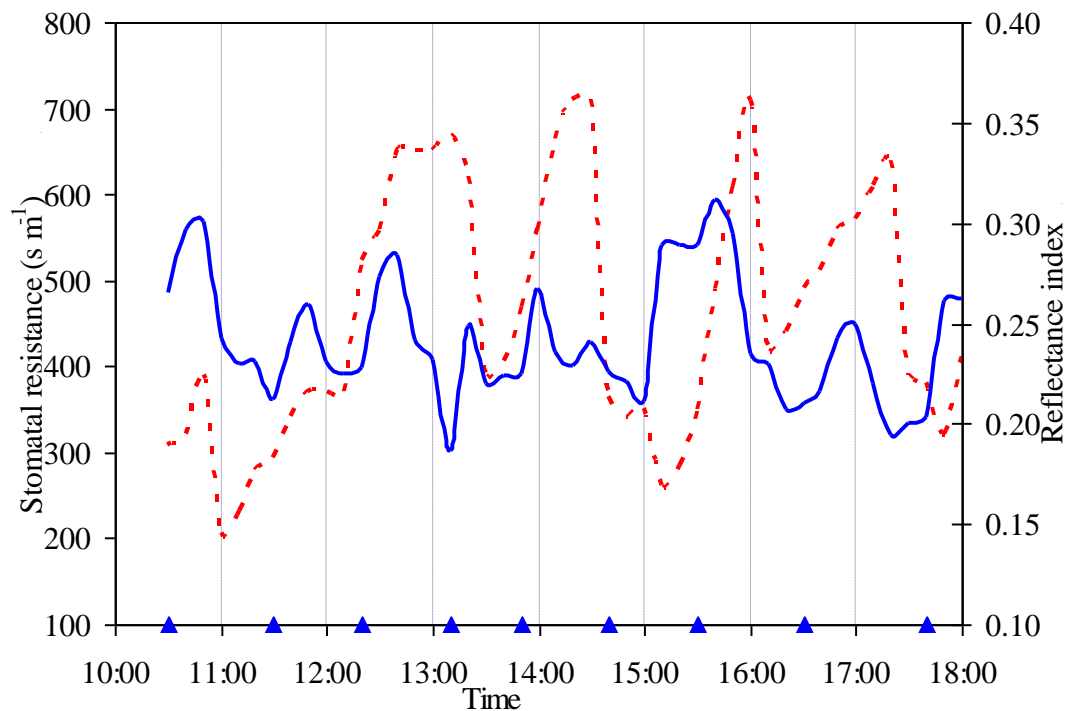
όπου R_{510} και R_{560} είναι η ανάκλαση ακτινοβολίας στα 510 nm και 560 nm αντίστοιχα.

Η κλασσική μορφή του PRI (Gamon κ.α., 1992; Penueles κ.α., 1994) χρησιμοποιεί τα μήκη κύματος 530 και 550 nm, αλλά το πολυφασματικό ραδιόμετρο που ήταν διαθέσιμο δεν μετρούσε σε αυτά.

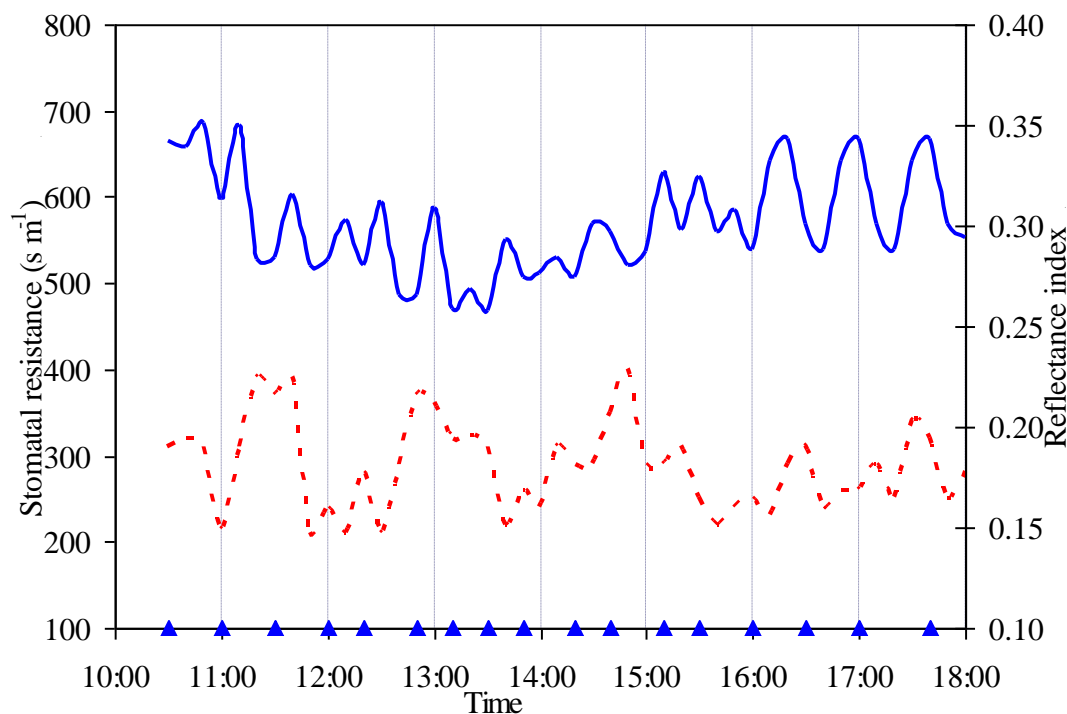


Εικόνα 44 Διακύμανση της διαφοράς θερμοκρασίας φυλλικής επιφάνειας – αέρα κατά τη διάρκεια μίας ημέρας (16/6) για τις δύο μεταχειρίσεις (LIF: συνεχής γραμμή, HIF: διακεκομμένη γραμμή). Με τελείες σημειώνονται τα αρδευτικά γεγονότα.

Σε δύο γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 45 και Εικόνα 46), παρουσιάζεται η μεταβολή της στοματικής αντίστασης των φύλλων στη διάχυση υδρατμών (r_s) και του sPRI σε σχέση με τα αρδευτικά γεγονότα για τις μεταχειρίσεις LIF και HIF αντίστοιχα. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει ξεκάθαρη συσχέτιση μεταξύ του sPRI και των αρδευτικών γεγονότων είναι φανερό ένα μοτίβο σχέσης μεταξύ των δύο αυτών παραγόντων. Ο sPRI φαίνεται να αυξάνεται μετά από κάθε αρδευτικό γεγονός με μία χρονική υστέρηση που εκφράζει τη βελτίωση της υδατικής κατάστασης των φυτών μετά την παροχή νερού στο υπόστρωμα. Παρόμοιες μεταβολές παρουσιάζονται και στις τιμές της στοματικής αντίστασης των φύλλων, οι οποίες μειώνονται (όπως ήταν αναμενόμενο) μετά από την άρδευση. Οι μεταβολές αυτές φαίνεται να ακολουθούν πιο σταθερά το μοτίβο μεταβολής στην μεταχείριση LIF.



Εικόνα 45 Μεταβολή του sPRI (συνεχής γραμμή) και της στοματικής αντίστασης φύλλων (διακεκομμένη γραμμή) για τη μεταχείριση LIF στις 16 Ιουλίου. Τα τρίγωνα αντιστοιχούν στα αρδευτικά γεγονότα.



Εικόνα 46 Μεταβολή του sPRI (συνεχής γραμμή) και της στοματικής αντίστασης φύλλων (διακεκομμένη γραμμή) για τη μεταχείριση HIF στις 16 Ιουλίου. Τα τρίγωνα αντιστοιχούν στα αρδευτικά γεγονότα.

Για την αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ sPRI και r_c εφαρμόστηκε στατιστική ανάλυση χρονοσειρών. Η στοματική αντίσταση για τις μεταχειρίσεις HIF και LIF εκφράστηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο AR(1) και έγιναν αλληλο-συσχετίσεις με τις τιμές sPRI που μετρήθηκαν για την κάθε μεταχείριση. Οι τιμές sPRI και r_c για την μεταχείριση HIF δεν συσχετίζονταν ενώ αυτές που αντιστοιχούσαν στην μεταχείριση LIF συσχετίζονταν με συντελεστή (lag)= -3.

Οι μέσες τιμές της στοματικής αντίστασης ήταν 288 (με τυπικό σφάλμα $\pm 6,8$) $s\ m^{-1}$ και 461 (με τυπικό σφάλμα ± 21) $s\ m^{-1}$ για τις μεταχειρίσεις HIF και LIF, αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει διαφοροποίηση στην υδατική κατάσταση μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων και ίσως μπορεί να εξηγήσει τη διαφορά που παρατηρείται στις μέσες τιμές του sPRI για τις δύο μεταχειρίσεις.

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο του πειράματος εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές –ως προς τη συχνότητα- μεταχειρίσεις άρδευσης. Η ίδια συνολική ποσότητα νερού παρέχονταν σε ημερήσια βάση στα φυτά των δύο μεταχειρίσεων, εφαρμόζοντας δύο προγράμματα: υψηλή συχνότητα (HIF, άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από το θερμοκήπιο γίνονταν ίσο με $1650\ kJ\ m^{-2}$) και χαμηλή συχνότητα (LIF, άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από το θερμοκήπιο γίνονταν ίσο με $3300\ kJ\ m^{-2}$). Οι μεταχειρίσεις αξιολογήθηκαν όσο αφορά την επίδραση στα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζέρμπερας.

Οι διαφορετικές συχνότητες δεν επηρέασαν, σε στατιστικά σημαντικό βαθμό, τα παραγωγικά (ποσοτικά και ποιοτικά) χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Βρέθηκε όμως ότι η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (WUE) ήταν υψηλότερη στην μεταχείριση LIF.

Στο πλαίσιο του πειράματος έγιναν και μετρήσεις ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από την φυλλική επιφάνεια με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συσχέτιση αρδευτικών γεγονότων και αλλαγών στην ανακλαστική συμπεριφορά της καλλιέργειας. Τα πρώτα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά αλλά χρειάζεται περαιτέρω έρευνα ώστε να βρεθούν πρακτικά εφαρμόσιμες μεθοδολογίες και δείκτες που θα μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου της άρδευσης.

Κεφάλαιο 6 - Μελέτη της σχέσης θ , CWSI, r_c , και ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια σε ανθοκομική καλλιέργεια υπό διάφορα επίπεδα υδατικής κατάστασης

Η αξιολόγηση της δυνατότητας χρησιμοποίησης δεδομένων ανακλαστικότητας από τη φυλλική επιφάνεια με σκοπό τη διαχείριση της άρδευσης εντός του θερμοκηπίου μπορεί να γίνει εάν η παραγόμενη πληροφορία συγκριθεί με ήδη καθιερωμένους δείκτες υδατικής κατάστασης των φυτών (CWSI, αντίσταση στη διάχυση υδρατμών κοκ) ή διαθεσιμότητας νερού (υδατικό δυναμικό, υγρασία υποστρώματος κοκ). Σε περίπτωση ισχυρών θετικών ενδείξεων θα μπορούσε να αξιολογηθεί στην συνέχεια εάν η σχετική πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα διαχείρισης της άρδευσης στο θερμοκήπιο (Exarchou, 2006; Löfkvist, 2010). Σήμερα σχεδόν όλα τα συστήματα που χρησιμοποιούνται σε παραγωγικές εφαρμογές χρησιμοποιούν έμμεση πληροφορία ώστε να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με τη συχνότητα και τη δόση της άρδευσης. Από την άλλη πλευρά, η επιστημονική κοινότητα είναι πεπεισμένη ότι η χρήση άμεσων δεικτών που θα αντικατοπτρίζουν την πραγματική υδατική κατάσταση της καλλιέργειας θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμη πιο αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης.

Όταν ο εφοδιασμός του φυτού σε νερό δεν καλύπτει τις ανάγκες διαπνοής, εμφανίζεται υδατική καταπόνηση. Το άνοιγμα των στοματίων επηρεάζεται άμεσα από το επίπεδο της υδατικής καταπόνησης (Lawlor και Tezara, 2009) και αυτό -μεταξύ άλλων- επηρεάζει το ρυθμό φωτοσύνθεσης (Sarlikioti κ.α., 2010 και 2011) και τη θερμοκρασία των φύλλων (Katsoulas κ.α., 2006). Η μεταβολή αυτή έχει επίδραση στην ανάκλαση (Knippling, 1970), την εκπομπή στην περιοχή του ορατού (Norikane και Kurata; 2001) και τη θερμική ακτινοβολία (Jones και Schofield, 2008) από τη φυλλική επιφάνεια. Σε αυτό το πλαίσιο η έρευνα έχει καταδείξει ότι η υδατική καταπόνηση μπορεί να εντοπιστεί αλλά και να ποσοτικοποιηθεί μέσω μετρήσεων ακτινοβολίας στα υπέρυθρο (Jackson κ.α. 1986; Penüelas κ.α., 1997; Ceccato κ.α. 2001; Jones και Schofield, 2008). Ο δείκτης θερμικής καταπόνησης (CWSI) που συνδέει την παρατηρούμενη -μέσω μετρήσεων της υπέρυθρης ακτινοβολίας- θερμοκρασία επιφάνειας με μετρημένα ή υπολογισμένα όρια θερμοκρασιών (ελάχιστο και μέγιστο) αποτελεί το πιο πετυχημένο εργαλείο που έχει προκύψει από την προσπάθεια αυτή (Prenger κ.α., 2005; Kacira κ.α. 2005; Jones και Schofield, 2008). Σειρά εργασιών, εκτός (Knippling, 1970; Sellers, 1985; Penüelas κ.α., 1993;

Schlemmer κ.α., 2005) και εντός (Penúelas κ.α., 1993; Kacira κ.α., 2005; Granta κ.α., 2006; Graeff και Clauprein, 2007; Zalaluk και Sri Ranjan, 2008; Sarlikioti κ.α., 2010 και 2011) θερμοκηπίου, είχαν ως στόχο να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού για τον εντοπισμό της υδατικής καταπόνησης. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται με το χρόνο και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η χρήση ενός μόνο μήκους κύματος (ή μιας στενής περιοχής γύρω από αυτό) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τον εντοπισμό φασματικών περιοχών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση και όχι για να χαρακτηρίσει με επαναληψιμότητα μία φυτική επιφάνεια (Sarlikioti κ.α., 2010)). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με το συνδυασμό δεδομένων από δύο ή περισσότερες περιοχές του φάσματος, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό σύνθετους φυτικούς δείκτες (Jackson και Huete, 1991). Οι Zakaluk και Sri Ranjan (2008) όπως έχει ήδη αναφερθεί ταξινομήσαν του δείκτες αυτούς σε δύο κατηγορίες:

- απλοί φυτικοί δείκτες (simple ratio (SR) vegetation indices) που προκύπτουν από τη διαίρεση της ανάκλασης σε δύο περιοχές του φάσματος και
- φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών (normalized difference (ND) vegetation indices) οι οποίοι υπολογίζονται διαιρώντας τη διαφορά της ανάκλασης σε δύο περιοχές του φάσματος με το άθροισμα της ανάκλασης στις ίδιες περιοχές.

Στο πλαίσιο αυτό έχουν μελετηθεί πλήθος δεικτών, μεταξύ των οποίων έχουν ξεχωρίσει:

- ο Water Band Index ($WBI = R_{970}/R_{902}$), αλλά μόνο εάν η υδατική καταπόνηση έχει ήδη εξελιχθεί (Penúelas κ.α., 1993),
- ο Physiological Reflectance Index ($PRI = (R_{550} - R_{530}) / (R_{550} + R_{530})$) που φαίνεται να έχει ευαισθησία στην υδατική καταπόνηση (Penúelas κ.α., 1994; Suárez κ.α., 2009) ακόμη και στα αρχικά της στάδια (Sarlikioti κ.α., 2010),
- ο Normalised Difference Vegetation Index ($NDVI = (R_{850} - R_{680}) / (R_{850} + R_{680})$), ο οποίος μειώνεται υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης (Penúelas κ.α., 1994).

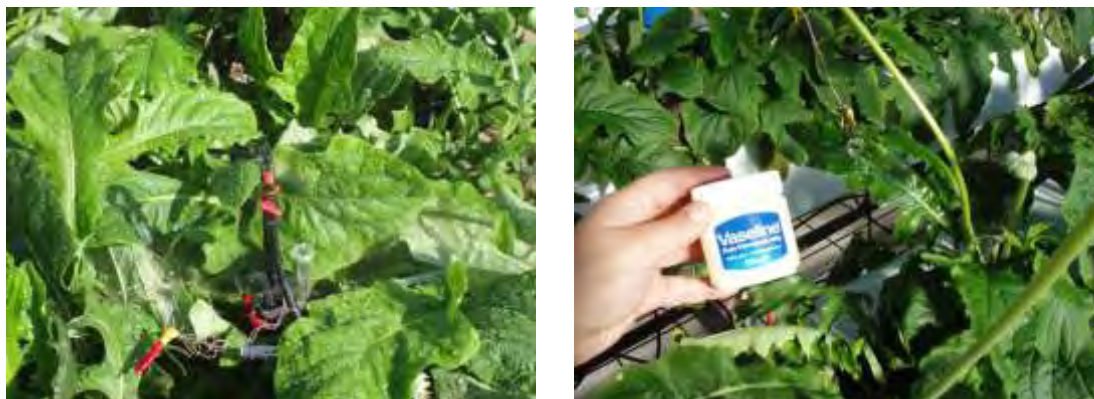
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε από Φεβρουάριο έως Οκτώβριο του 2009, στο γυάλινο θερμοκήπιο AAT του ΤΕΙ Ηπείρου (αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασης και του εξοπλισμού έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο). Χρησιμοποιήθηκε το μεσαίο τμήμα του θερμοκηπίου (12 πάγκοι, 160m²). Σημειώνεται ότι τα ανοίγματα

αερισμού άνοιγαν όταν η θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερη από 22°C (Katsoulas κ.α., 2007).

Χρησιμοποιήθηκε η καλλιέργεια ζέρμπερας (*Gerbera jamesonii* cv. Balance®) που περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο (ώριμη καλλιέργεια, σε γλάστρες των 4-L (ένα φυτό ανά γλάστρα) που περιείχαν ελαφρόπετρα 0-5 mm, συνολική πυκνότητα φύτευσης 2,7 φυτά m⁻², κάλυψη όλων των καναλιών με πλαστικό φιλμ για την εμποδισή της εξάτμισης από το υπόστρωμα, άρδευση με θρεπτικό διάλυμα με τιμές pH και EC 5,6 και 1,72 dS m⁻¹ αντίστοιχα, αυτόματος έλεγχος του συστήματος με βάση το χρονικό ολοκλήρωμα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου).

Στο πλαίσιο του πειράματος εφαρμόστηκαν για ορισμένη περίοδο τρεις μεταχειρίσεις άρδευσης (επαρκώς αρδευόμενη: 100%ET_c, μερικώς αρδευόμενη: (50% ή 33%ET_c) και υδατικά καταπονούμενη: 0%ET_c) με σκοπό τη συγκέντρωση δεδομένων για την αξιολόγηση της σύνδεσης φασματικών φυτικών δεικτών και υδατικής κατάστασης. Σε κάθε περίπτωση οι ανάγκες σε νερό εκτιμήθηκαν με βάση τις διαδικασίες που περιγράφονται στο FAO paper 56 (Allen κ.α., 1998) ενώ το όριο συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας για την ενεργοποίηση και η δόση άρδευσης υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφουν οι Katsoulas κ.α. (2006).



Εικόνα 47 Συνεχής διαβροχή για τη μέτρηση της T_{min} (αριστερά) και κάλυψη με βαζελίνη – εμποδισή διαπνοής για τη μέτρηση της T_{max} (δεξιά)

Εκτός από την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία (με σκοπό τον έλεγχο της άρδευσης) και των τυπικών παραμέτρων του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου (θερμοκρασία και σχετική υγρασία αέρα και εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία) οι καταγραφές αφορούσαν και υγρασία υποστρώματος, θερμοκρασία φύλλων, αντίσταση στη διάχυση υδρατμών και ανάκλαση από τη φυλλική επιφάνεια.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλων (T_l , °C) γίνονταν με τη χρήση θερμοζευγών (Copper (PFA 0,01mm)-Constantan (PFA Teflon 0,01mm); OMEGA Engineering, USA), τρία θερμοζεύγη με κοινή σύνδεση για κάθε φυτό σε τυχαία (αλλά υγιή) φύλλα 4 φυτών ανά μεταχείριση. Τα θερμοζεύγη ήταν σε επαφή με το κάτω μέρος των φύλλων και η θερμοκρασία φυλλικής επιφάνειας (T_e) υπολογίζονταν ως η μέση τιμή των φυτών κάθε μεταχείρισης. Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών ορίων του CWSI, χρησιμοποιήθηκαν συνεχείς μετρήσεις θερμοκρασίας σε «υγρά» και «ξηρά» φύλλα αναφοράς (Εικόνα 47) σύμφωνα με την προσέγγιση που περιγράφουν οι Granta κ.α. (2006). Τα «υγρά» φύλλα διαβρέχονταν συστηματικά (με εκτοξευτήρες υδρονέφωσης) με νερό και από τις δύο πλευρές ενώ τα «ξηρά» φύλλα ήταν καλυμμένα με βαζελίνη και στις δύο τους πλευρές. Οι μετρήσεις γίνονταν κάθε 30s και οι μέσοι όροι δεκαλέπτου (10 min) αποθηκεύονταν σε καταγραφική συσκευή (DL2e Logger, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK).

Σε επιλεγμένες ημέρες κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου, γίνονταν ειδικές μετρήσεις κάθε 15 λεπτά από τις 8:00 έως τις 17:00. Από αυτά τα ημερήσια σετ μετρήσεων όσα αφορούσαν παρόμοιες συνθήκες περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν ως επαναλήψεις. Οι μετρήσεις αυτές αφορούσαν:

- περιεχόμενο υποστρώματος σε νερό (θ) το οποίο μετρούνταν με ένα φορητό αισθητήρα (ThetaProbe ML2x, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK),
- στοματική αντίσταση (r_l) που μετρούνταν με ένα πορόμετρο (AP4, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) και
- ανακλώμενη από τη φυλλική επιφάνεια ακτινοβολία (RR) που μετρούνταν με ένα φορητό πολυφασματικό ραδιόμετρο (MSR87, CropScan Inc., Rochester, USA) σε στενές περιοχές γύρω από 8 μήκη κύματος (460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810nm). Το ραδιόμετρο ήταν τοποθετημένο 1,5m πάνω από την φυλλική επιφάνεια και αυτό σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή αντιστοιχεί σε περιοχή δείγματος επί της φυλλικής επιφάνειας με εμβαδόν 0,44 m².

Το μεγάλο πρόβλημα με τις μετρήσεις ανακλαστικότητας εντός του θερμοκηπίου είναι οι σκιάσεις από τα στοιχεία του σκελετού και τον εξοπλισμό. Κατά την περίοδο μέτρησης της ανάκλασης η θερμοκουρτίνα με την οποία ήταν εξοπλισμένο το θερμοκήπιο ήταν μαζεμένη. Για να μειωθεί η επίδραση των σκιών στις μετρήσεις με το ραδιόμετρο χρησιμοποιήθηκε μία διαδικασία ρύθμισης και μία ειδική τεχνική λήψης μετρήσεων (έχει ήδη αναφερθεί) σύμφωνα με οδηγίες που στάλθηκαν από τον κατασκευαστή (Nantt, 2008). Ως επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιήθηκε μία λευκή

επιφάνεια (λευκό φιλμ LDPE κολλημένο σε ξύλινη επιφάνεια, Εικόνα 48) γνωστής ανάκλασης (όπως μετρήθηκε σε ανεμπόδιστες συνθήκες εκτός θερμοκηπίου) τοποθετήθηκε στο επίπεδο της φυλλικής επιφάνειας.



Εικόνα 48 Μετρήσεις ανάκλασης πάνω από λευκή επιφάνεια αναφοράς

Βέβαια ενώ η χρήση της λευκής επιφάνειας αναφοράς μπορούσε να απομακρύνει σημαντικό μέρος των επιδράσεων από τις σκιάσεις δεν μπορούσε να κάνει το ίδιο και με τις επιδράσεις από την ανάκλαση ακτινοβολίας από υπόστρωμα που μπορεί να ήταν ορατό ή από το φύλλο εμπόδισης της εξάτμισης με το οποίο ήταν καλυμμένα τα κανάλια. Για το λόγο αυτό ο κενός χώρος μεταξύ φυτών γεμίζονταν κατά την περίοδο των μετρήσεων με μαύρο ματ ύφασμα. Διαφοροποιήσεις ανάκλασης που οφείλονταν σε άνθη, ασθένειες, κτυπήματα και τροφοπενίες δεν μπορούσαν να αντιμετωπιστούν και για το λόγο αυτό οι μετρήσεις γίνονταν μόνο πάνω από υγιή φυτά σε άψογη κατάσταση από τα οποία είχαν αφαιρεθεί όλα τα άνθη.

Στο πλαίσιο του πειράματος αυτού, αξιολογήθηκαν κοινοί φυτικοί δείκτες που αφορούσαν την ανάκλαση στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος όσο αφορά στη σχέση τους με την υδατική καταπόνηση. Οι δείκτες που αξιολογήθηκαν είναι οι ακόλουθοι (το R αντιστοιχεί στο ποσοστό ανάκλασης στην περιοχή του μήκους κύματος που φαίνεται στον δείκτη):

- SB – απλά μήκη κύματος (ανάκλαση σε κάθεάνα από τα διαφορετικά μήκη κύματος του πολυφασματικού ραδιόμετρου (460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810nm).
- GB – απλοί λόγοι πράσινου μπλε
 - (1): R_{560}/R_{460}
 - (2): R_{510}/R_{460}
- RB - απλοί λόγοι κόκκινου μπλε
 - (1) R_{710}/R_{460}
 - (2): R_{660}/R_{460}
 - (3): R_{610}/R_{460}
- GR - απλοί λόγοι πράσινου κόκκινου
 - (1): R_{510}/R_{710}
 - (2): R_{510}/R_{660}
 - (3): R_{510}/R_{610}
 - (4): R_{560}/R_{710}
 - (5): R_{560}/R_{660}
 - (6): R_{560}/R_{610}
- NDGR- δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών πράσινου κόκκινου
 - (1): $(R_{510} - R_{710}) / (R_{510} + R_{710})$
 - (2): $(R_{510} - R_{660}) / (R_{510} + R_{660})$
 - (3): $(R_{510} - R_{610}) / (R_{510} + R_{610})$
 - (4): $(R_{560} - R_{710}) / (R_{560} + R_{710})$
 - (5): $(R_{560} - R_{660}) / (R_{560} + R_{660})$
 - (6): $(R_{560} - R_{610}) / (R_{560} + R_{610})$
- NDGB - δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών πράσινου μπλε
 - (1) $(R_{510} - R_{460}) / (R_{510} + R_{460})$
 - (2): $(R_{560} - R_{460}) / (R_{560} + R_{460})$
- NDRB - δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών κόκκινου μπλε
 - (1): $(R_{710} - R_{460}) / (R_{710} + R_{460})$
 - (2): $(R_{660} - R_{460}) / (R_{660} + R_{460})$
 - (3): $(R_{610} - R_{460}) / (R_{610} + R_{460})$
- $sPRI = (R_{560} - R_{510}) / (R_{560} + R_{510})$ (ένας δείκτης παρόμοιος με τον PRI- Physiological Reflectance Index. Ο τυπικός PRI χρησιμοποιεί την ανάκλαση στα 530 και 550 nm, όμως το ραδιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε δεν μετρά σε αυτά τα μήκη κύματος, έτσι χρησιμοποιήθηκε η ανάκλαση στα 510 και τα 560nm που ήταν διαθέσιμη).

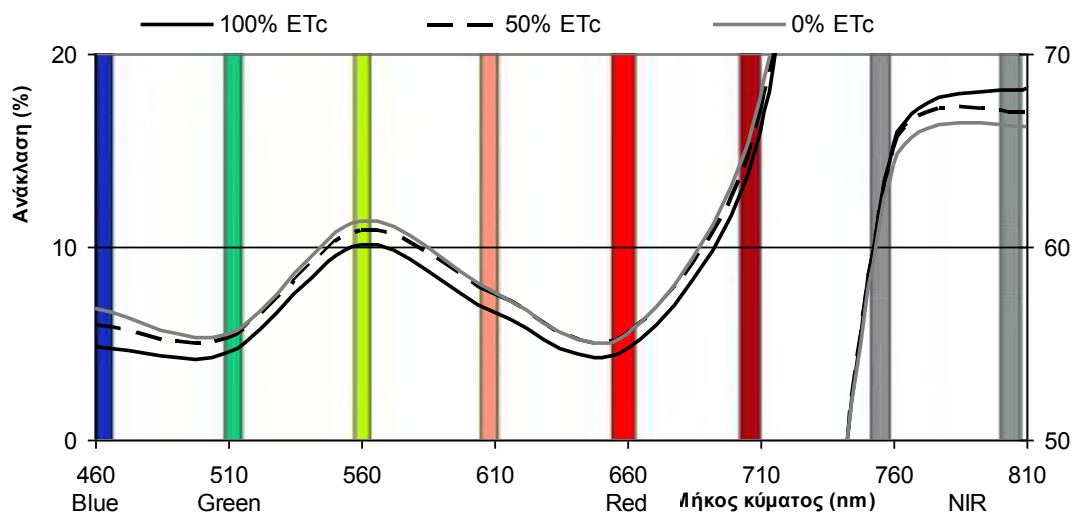
- sNDVI
 - (1): $(R_{810} - R_{710}) / (R_{810} + R_{710})$
 - (2): $(R_{810} - R_{660}) / (R_{810} + R_{660})$

Η στατιστική ανάλυση έγινε με τη χρήση του λογισμικού PlotIT (Scientific Programming Enterprises, USA).

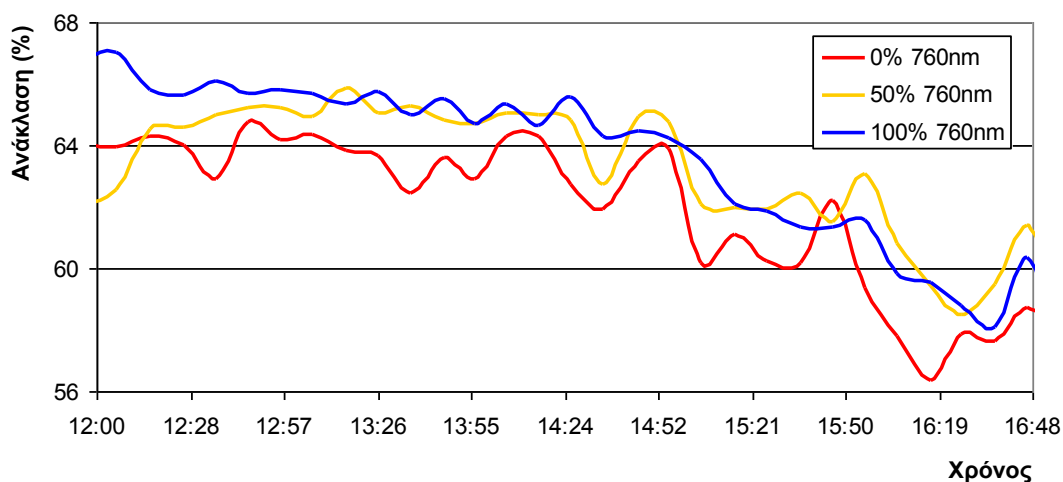
Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 49 παρουσιάζονται φάσματα ανάκλασης φυλλικής επιφάνειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ETc, 50%ETc και 0%ETc-Υδατικό στρες) το μεσημέρι (14:00) μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (οι καμπύλες για τα 760 και τα 810nm αναφέρονται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα). Είναι φανερό –και η στατιστική ανάλυση επιβεβαίωσε μία ισχυρή θετική συνδιακύμανση- ότι όλες οι καμπύλες μεταβάλλονται με παρόμοιο τρόπο. Η εφαρμογή t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95% έδειξε ότι το φάσμα της καταπονημένης μεταχείρισης (0%ETc) διαφέρει σημαντικά από αυτά των αρδευόμενων (50%ETc και 100%ETc). Δηλαδή ότι οι διαφορές, αποκλίσεις ή έκτροπα αποτελέσματα οφείλονται αποκλειστικά σε τυχαία και όχι σε συστηματικά σφάλματα.

Οι αναμενόμενες από τη σχετική βιβλιογραφία διαφορές μεταξύ επαρκώς αρδευόμενης και υπό υδατική καταπόνηση μεταχειρίσεων επιβεβαιώθηκαν από τις μετρήσεις. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 51, η ανάκλαση είναι πιο έντονη για την φυλλική επιφάνεια της υπό υδατική καταπόνηση μεταχείρισης στην περιοχή των 500nm (Knipling, 1970), 620nm (Cure κ.α., 1989) και 710nm (Nantt, 2009) και λιγότερο έντονη πάνω από τα 760nm (Nantt, 2009, Εικόνα 50). Ακόμη ο sPRI και οι sNDVI1 and 2 είχαν μικρότερες τιμές για μετρήσεις πάνω από επιφάνειες υπό υδατική καταπόνηση (Penñelas κ.α., 1994). Για όλα τα προαναφερθέντα μήκη κύματος και δείκτες οι διαφορές μεταξύ καταπονημένης μεταχείρισης (0%ETc) και αρδευόμενων μεταχειρίσεων (50%ETc και 100%ETc) διέφεραν σημαντικά. Από την άλλη πλευρά οι διαφορές για τις μεταχειρίσεις 50%ETc και 100%ETc δεν διέφεραν σημαντικά. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάκλαση στο ορατό πιθανότατα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης μόνο όταν έχει ήδη αναπτυχθεί ένα σημαντικό επίπεδο καταπόνησης. Παρόμοιες θέσεις έχουν εκφραστεί και από τους Hunt και Rock (1989), Riggs κ.α. (1991), Penñelas κ.α. (1993) και Inoue και Penñelas (2006).



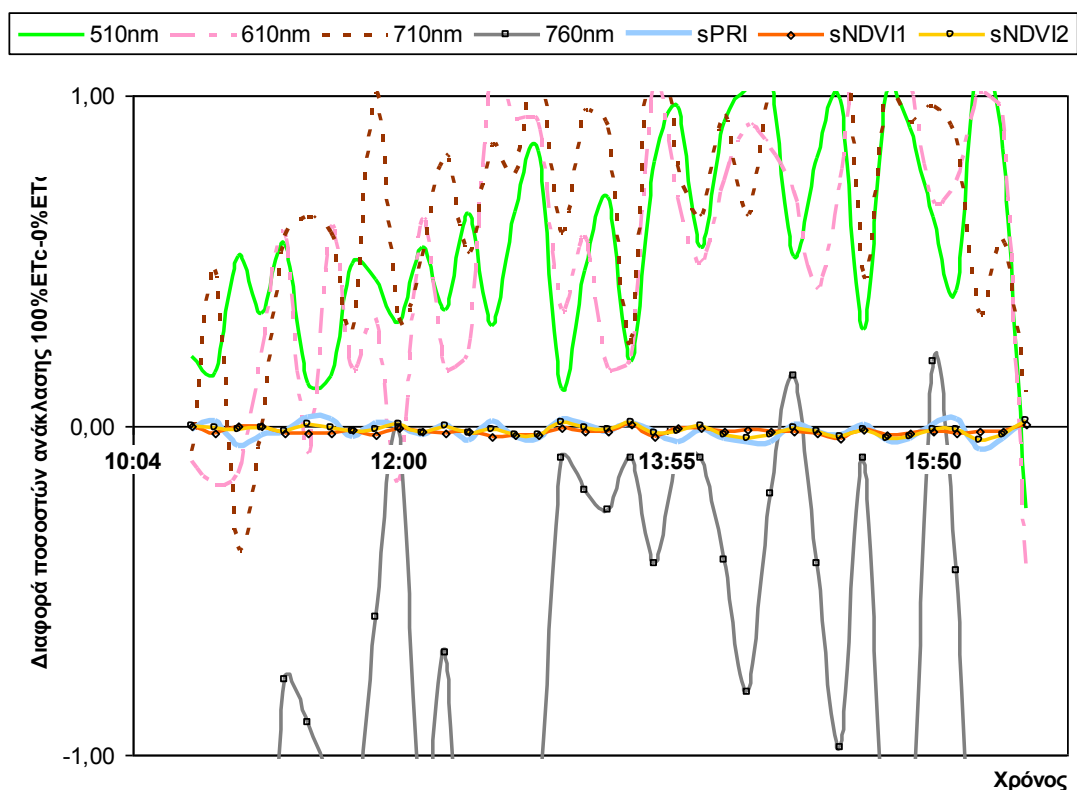
Εικόνα 49 Χαρακτηριστικά φάσματα ανάκλασης φυλλικής επιφάνειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ETc, 50%ETc και 0%ETc-Υδατικό στρες) το μεσημέρι (14:00) μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (οι καμπύλες για τα 760 και τα 810nm αναφέρονται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα)



Εικόνα 50 Ημερήσια πορεία της ανάκλασης στα 760nm από φυλλική επιφάνειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ETc, 50%ETc και 0%ETc-Υδατικό στρες) κατά τη διάρκεια μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (14/7/2009)

Με σκοπό την μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ θ , CWSI και rl και όλων των απλών μηκών κύματος, των απλών λόγων και των κανονικοποιημένων διαφορών έγινε ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης. Η ανάλυση έδειξε καλή γραμμική συσχέτιση (R^2 μεταξύ 0,7 και 0,8) για τις αρδευόμενες μεταχειρίσεις (50%ETc και 100%ETc) μεταξύ

θν και της ανάκλασης στα 510, 560 και 610nm, των απλών λόγων GR5 και GR6, του sPRI και του sNDVI2.

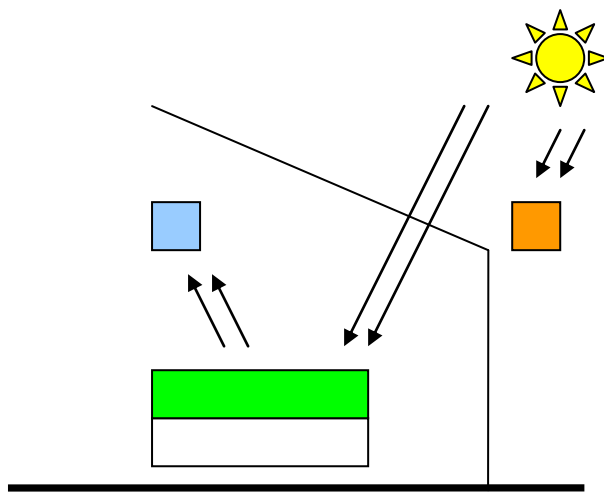


Εικόνα 51 Διαφορά στην ανακλαστικότητα μεταξύ μεταχείρισης υπό υδατική καταπόνηση (0%ETc) και επαρκώς αρδευόμενης μεταχείρισης (100%ETc) κατά τη διάρκεια μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας για επιλεγμένα μήκη κύματος και φασματικούς φυτικούς δείκτες

Οι Carter (1991) και Graeff και Clauprein (2007) ανέφεραν ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ ανάκλασης και υδατικής κατάστασης των φυτών στα 480-490, 510, 540 και 780nm αντίστοιχα. Οι Suárez κ.α. (2009) εντόπισαν καλές γραμμικές σχέσεις μεταξύ PRI και υδατικής καταπόνησης όπως αυτή εκφραζόταν μέσω της θερμοκρασίας επιφάνειας. Η ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων έδειξε ασθενή συσχέτιση μεταξύ RI και των υπό αξιολόγηση φασματικών φυτικών δεικτών. Ο CWSI παρουσίασε ισχυρή γραμμική συσχέτιση (R^2 περίπου 0,9), για τις καλά αρδευόμενες μεταχειρίσεις με την ανάκλαση στα 510nm ($R^2 = 0,86$), τους απλούς λόγους RB1 ($R^2 = 0,97$), GB1 ($R^2 = 0,91$) και τους δείκτες NDRB1 ($R^2 = 0,97$) και NDGB2 ($R^2 = 0,97$). Για την μεταχείριση υπό υδατική καταπόνηση καλή γραμμική συσχέτιση εντοπίσθηκε για την ανάκλαση στα 510nm ($R^2 = 0,81$) για τον απλό λόγο RB1 ($R^2 = 0,83$) και το δείκτη NDRB1 ($R^2 = 0,82$).

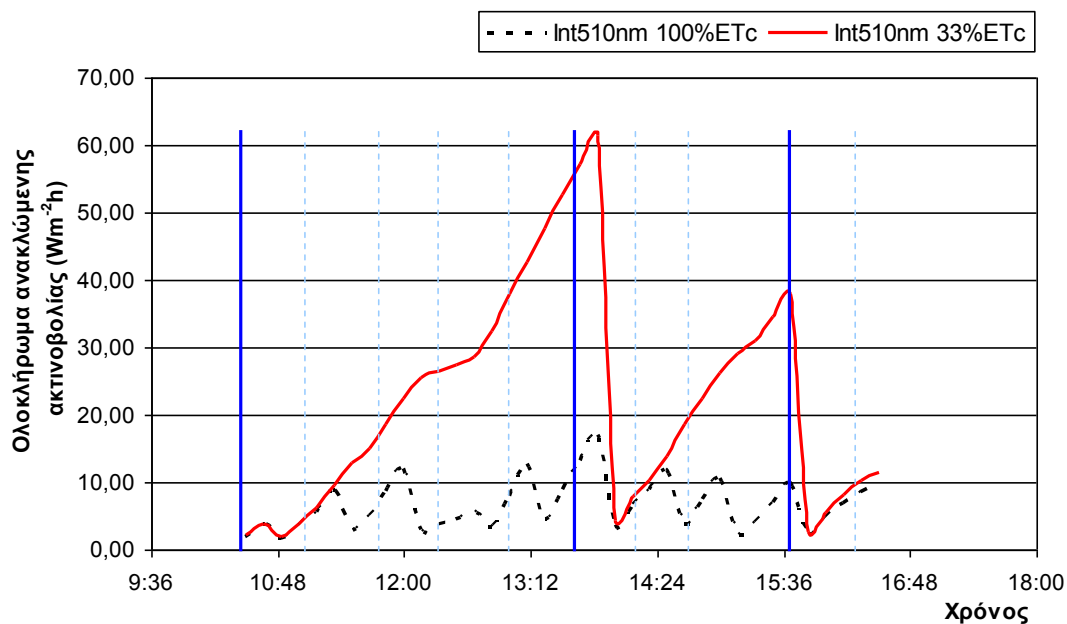
Επομένως η ανάκλαση στα 510nm καθώς και οι δείκτες $RB1(R_{710}/R_{460})$ και $NDRB1((R_{710} - R_{460})/(R_{710} + R_{460}))$ έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης τόσο στις αρδευόμενες όσο και στις υπό υδατική καταπόνηση μεταχειρίσεις.

Είναι λογικό να σκεφτούμε ότι καθώς ένα τυπικό σύστημα αυτόματου ελέγχου άρδευσης ολοκληρώνει ως προς το χρόνο την ολική ηλιακή ακτινοβολία που μετρίεται με ένα πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου με σκοπό να αποφασίσει σχετικά με το πότε θα συμβούν τα αρδευτικά γεγονότα, η ρύθμιση της συχνότητας της άρδευσης δεν λαμβάνει ουσιαστικά καθόλου υπόψη της την κατάσταση της καλλιέργειας. Πιθανότατα ένα σύστημα μπορεί να βασιστεί σε μία παρόμοια αρχή λειτουργίας αλλά να λαμβάνει υπόψη του τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας εάν αντί για την προσπίπτουσα ολοκληρώνει την ανακλώμενη ακτινοβολία (Εικόνα 52).



Εικόνα 52 Σχηματική παράσταση μηχανισμών ολοκλήρωσης προσπίπτουσας εξωτερικής ακτινοβολίας (δεξιά) και ανακλώμενης ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια (αριστερά)

Στην Εικόνα 53 παρουσιάζεται ένα σχετικό παράδειγμα με ολοκλήρωση της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην περιοχή των 500nm. Το χρονικό ολοκλήρωμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας επί την ανάκλαση στα 510nm υπολογίζεται μεταξύ αρδευτικών γεγονότων που ελέγχονται από το υφιστάμενο σύστημα (που λαμβάνει υπόψη του το ολοκλήρωμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας). Τα ολοκληρώματα μηδενίζονται όταν συμβαίνει άρδευση. Είναι φανερό ότι υπάρχουν θετικές ενδείξεις για περαιτέρω αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 53 Εξέλιξη του ολοκληρώματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας (ο υπολογισμός ξεκινά από το 0 μετά από κάθε αρδευτικό γεγονός) για μερικώς (33%ETc) και επαρκώς αρδευόμενες (100%ETc) μεταχειρίσεις κατά τη διάρκεια μίας τυπικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας. Οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στο χρόνο των αρδευτικών γεγονότων (συνεχής για την 33%ETc, συνεχείς και διακεκομμένες για την 100%ETc)

Η αξιοποίηση πολυφασματικών φυτικών δεικτών αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας καθώς μπορεί να οδηγήσει σε άμεσες, αντιπροσωπευτικές και αποτελεσματικές μεθόδους για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης καλλιεργειών εντός του θερμοκηπίου.

Σύνοψη προβλημάτων μέτρησης ανάκλασης εντός του θερμοκηπίου και λύσεων που προτάθηκαν και εφαρμόστηκαν

Στη διάρκεια των μετρήσεων εντοπίστηκε μία σειρά από προβλήματα και προτάθηκαν εναλλακτικές προσεγγίσεις ώστε αυτά να λυθούν και οι μετρήσεις ανάκλασης να έχουν αποδεκτή ακρίβεια. Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις βελτιώσεις που προτάθηκαν και τον τρόπο με τον οποίο αυτές εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 6 Βελτιώσεις για μετρήσεις ανάκλασης από φυλλική επιφάνεια

Προβλήματα και προτάσεις	Εφαρμογή
Αύξηση της πυκνότητας φύτευσης ώστε να μην υπάρχουν κενά στα οποία να εμφανίζεται το υπόστρωμα (του οποίου η ανάκλαση μεταβάλλεται εάν είναι βρεγμένο), το πλαστικό φιλμ κάλυψης των καναλιών για μείωση εξάτμισης κοκ.	<ul style="list-style-type: none">▪ Τοποθετήθηκαν επιπλέον σειρές φυτών με αποτέλεσμα να υπάρχει πυκνότερη φυτοκάλυψη.▪ Τοποθετήθηκε μαύρο ματ ύφασμα στα όποια κενά.
Για τον υπολογισμό του T_{min} να γίνεται συνεχής διαβροχή του φύλλου που φέρει τον αισθητήρα.	<ul style="list-style-type: none">▪ Εφαρμόστηκε συνεχής διαβροχή της περιοχής με μικροεκτοξευτήτα υδρονέφωσης.
Να γίνονται μετρήσεις και σε λευκή επιφάνεια έξω από το θερμοκήπιο για απομόνωση μεταβολών λόγω κίνησης ήλιου και σκιών.	<ul style="list-style-type: none">▪ Έγιναν δοκιμές αλλά το αποτέλεσμα δεν ήταν ικανοποιητικό
Να γίνουν μετρήσεις σε καλλιέργεια σε χώμα μια και οι πολύ συχνές αρδεύσεις που απαιτούνται στην υδροπονία δεν επιτρέπουν στις όποιες φυσιολογικές μεταβολές προκαλούνται από την υδατική καταπόνηση να εξελιχθούν με αποτέλεσμα να μην είναι ιδιαίτερα έντονες και οι αντίστοιχες μεταβολές της ανάκλασης	<ul style="list-style-type: none">▪ Έγιναν δοκιμές με καλά αποτελέσματα και αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί σχετικό πείραμα

Κεφάλαιο 7 – Μελέτη της σχέσης θ , CWSI και ανάκλασης ηλιακής ακτινοβολίας από φυλλική επιφάνεια σε καλλιέργεια ρόκας υπό διάφορα επίπεδα υδατικής κατάστασης

Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό η διαχείριση της άρδευσης σχετίζεται με τον καθορισμό της συχνότητας και της δόσης που συνήθως βασίζεται στην εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Αυτός ο κρίσιμος υπολογισμός βασίζεται συχνά στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET_c) μέσω ενός ενεργειακού ισοζυγίου. Για καλλιέργειες στον αγρό η εκτίμηση γίνεται με επιτυχία χρησιμοποιώντας μία από τις προσεγγίσεις που παρουσιάζονται στο FAO paper 56 (Allen κ.α., 1998), δηλαδή την Penman-Monteith ή την Hargreaves. Οι κλιματικές καθώς και οι καλλιεργητικές συνθήκες εντός των θερμοκηπίων διαφέρουν από αυτές του αγρού σε πολλά σημεία (Orgaz κ.α., 2005), και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικά ενεργειακά ισοζύγια για αυτές τις περιπτώσεις (Stanghellini, 1987, Baille κ.α., 1994, Prenger κ.α., 2002, Donatelli κ.α., 2006). Σε κάθε περίπτωση όμως, επειδή οι ακριβείς αλλά πολύπλοκες μέθοδοι είναι συνήθως δύσκολο να αξιοποιηθούν από τους περισσότερους αγρότες που ασχολούνται με τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες (Mrusia, 2006; Löfkvist, K. 2010), η γενικευμένη προσέγγιση των Allen κ.α. (1998) αποδεικνύεται πολύτιμη και σε αυτή την περίπτωση (Orgaz κ.α., 2005). Άλλες απλοποιημένες προσεγγίσεις όπως αυτή που έχει προταθεί από τον Baille κ.α. (1994), παραμένουν επίσης χρήσιμες σε πρακτικό επίπεδο (Katsoulas κ.α., 2006), έχοντας επιπλέον το πλεονέκτημα του ότι έχουν αναπτυχθεί για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Η *Eruca sativa* (syn. *E. vesicaria* subsp. *sativa* (Miller) Thell., *Brassica eruca* L.), γνωστή ως ρόκα (Blamey and Grey-Wilson, 1989) είναι ένα εδώδιμο λαχανικό που βρίσκεται ως αυτοφυές σε όλη τη ζώνη του Μεσογειακού κλίματος. Η καλλιέργεια της ρόκας έχει αυξηθεί στην περιοχή της Μεσογείου κατά τις τελευταίες δεκαετίες ως συνέπεια της αύξησης της κατανάλωσης (Nicola κ.α., 2003, Akoumianakis κ.α., 2008, Pagoulitou, 2008, Omirou, 2009). Παραδοσιακά η ρόκα καλλιεργείται στο χώμα και προσαρμόζεται καλά τόσο στον ανοικτό αγρό όσο και στα θερμοκήπια (Padulosi, 1995). Ακόμη η καλλιέργειά της σε υποστρώματα (κυρίως υδροπονική τεχνική float system) έχει αποδειχθεί άριστη όσο αφορά την ανάπτυξη των φυτών (Nicola κ.α., 2007). Οι Nicola κ.α., (2005) αναφέρουν ότι η υδροπονική καλλιέργεια ρόκας οδηγεί

σε έως και 75% αύξηση της παραγωγής σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές καλλιέργειας. Από την άλλη αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος της δημοσιευμένης έρευνας σχετικά με τη ρόκα, αφορά πειράματα που έχουν γίνει εντός γυάλινων θερμοκηπίων (Padulosi, 1995, Nicola κ.α., 2003, Akoumianakis κ.α., 2008, Omirou, 2009).

Ως θερμόφιλο φυτό η *E. sativa* προσαρμόζεται καλά σε στεγνά εδάφη και ξηρές συνθήκες (Seema κ.α., 2004), αν και η άρδευση προκαλεί σημαντική αύξηση της παραγωγής (Singh κ.α., 1992, Padulosi, 1995). Με στόχο την ανάπτυξη ποιοτικά καλών - μαλακών φύλλων (ποιοτικό ζητούμενο από τους καταναλωτές) απαιτείται η διατήρηση της εδαφικής υγρασίας σε κατάλληλα επίπεδα (Nicola κ.α., 2003, Omirou, 2009). Η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε στο πλαίσιο προετοιμασίας του πειράματος που αφορά αυτό το κεφάλαιο έδειξε ότι υπάρχει έλλειψη τιμών K_c (Allen et al., 1998) ή άλλων απλών συντελεστών εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής (Baille κ.α., 1994) για καλλιέργεια ρόκας εντός θερμοκηπίου. Έτσι η διαμόρφωση σχετικών προγραμμάτων άρδευσης βασίζεται αποκλειστικά σε εμπειρικές προσεγγίσεις.

Από την άλλη πλευρά η διαχείριση της άρδευσης στα σύγχρονα θερμοκήπια γίνεται μέσω αυτόματων συστημάτων που αξιοποιούν μετρήσεις από κατάλληλους αισθητήρες. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιείται μία πληθώρα εισόδων δεδομένων με σκοπό την εξασφάλιση της κάλυψης των αναγκών της καλλιέργειας σε νερό (Exarchou, 2006, Mrusia, 2006, Löfkvist, 2010), αλλά η πλειοψηφία των χρησιμοποιούμενων στην πράξη εφαρμογών χρησιμοποιεί έμμεσες μετρήσεις για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών. Στις ημέρες μας υπάρχει μία γενικευμένη αποδοχή σχετικά με τα πλεονεκτήματα των άμεσων φυσιολογικών δεικτών όσο αφορά τον χαρακτηρισμό της κατάστασης των φυτών και τον εντοπισμό σχετικών καταπονήσεων – συμπεριλαμβανομένης και της υδατικής -, όμως η εφαρμογή τους σε πρακτικό επίπεδο παραμένει μία πρόκληση (Jones, 2004).

Όταν η διαθεσιμότητα νερού στα φυτά δεν καλύπτει τις ανάγκες διαπνοής τους, εμφανίζεται υδατική καταπόνηση. Το άνοιγμα των στοματίων επηρεάζεται άμεσα από την κατάσταση αυτή (Lawlor και Tezara, 2009) και αυτό μεταξύ άλλων επηρεάζει τη θερμοκρασία των φύλλων (Katsoulas κ.α., 2006) και το ρυθμό φωτοσύνθεσης (Sarlikioti κ.α., 2010). Εξαιτίας αυτών, επηρεάζονται και μία σειρά από παράγοντες όπως: η ανάκλαση του ηλιακού φωτός (Knippling, 1970), η εκπομπή ακτινοβολίας χλωροφύλλης (Norikane και Kurata, 2001) και η μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας (Jones και Schofield, 2008). Στο πλαίσιο αυτό, προηγούμενη έρευνα έχει καταδείξει ότι η υδατική κατάσταση του φυτού μπορεί να ανιχνευθεί μετρώντας την ακτινοβολία σε μήκη κύματος στην περιοχή του υπέρυθρου (Jackson κ.α., 1986, Penñelas κ.α., 1997, Ceccato κ.α., 2001, Jones και Schofield, 2008). Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο

δείκτης θερμικής καταπόνησης (CWSI) που συνδέει την παρατηρούμενη -μέσω μετρήσεων της υπέρυθρης ακτινοβολίας- θερμοκρασία επιφάνειας με μετρημένα ή υπολογισμένα όρια θερμοκρασιών (ελάχιστο και μέγιστο) αποτελεί το πιο πετυχημένο εργαλείο που έχει προκύψει από την προσπάθεια αυτή (Prenger κ.α., 2005, Kacira κ.α., 2005, Jones και Schofield, 2008, Erdem κ.α., 2010).

Αρκετές εργασίες προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν τη σχέση μεταξύ υδατικής καταπόνησης και ανάκλασης -μέσω σχετικών δεικτών- στην περιοχή του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου (Knippling, 1970, Sellers, 1985, Penñelas κ.α., 1993, Schlemmer κ.α., 2005). Ένας μεγάλος αριθμός των προσπαθειών αυτών αφορούσαν καλλιέργειες εντός θερμοκηπίου (Penñelas κ.α., 1993, Kacira κ.α., 2005, Granta κ.α., 2006, Graeff και Claupen, 2007, Zalaluk και Sri Ranjan, 2008, Sarlikioti κ.α., 2010). Για λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο (μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου και των ατμοσφαιρικών συνθηκών) η χρήση ενός μόνο μήκους κύματος (ή μιας στενής περιοχής γύρω από αυτό) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τον εντοπισμό φασματικών περιοχών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση και όχι για να χαρακτηρίσει με επαναληψιμότητα μία φυτική επιφάνεια (Sarlikioti κ.α., 2010)). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με το συνδυασμό δεδομένων από δύο ή περισσότερες περιοχές του φάσματος, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό φυτικούς δείκτες (Jackson και Huete, 1991). Οι πιο κοινές μορφές τέτοιων δεικτών (απλοί φυτικοί δείκτες (simple ratio (SR) vegetation indices) και φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών (normalized difference (ND) vegetation indices))) αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Zakaluk και Sri Ranjan, 2008).

Ο κύριος στόχος της πειραματικής αυτής διερεύνησης είναι η μελέτη της σχέσης μεταξύ διαθεσιμότητας νερού και πολυφασματικής ανάκλασης από την κόμη μίας λαχανοκομικής καλλιέργειας. Συμπληρωματικά αναπτύχθηκε πληροφορία σχετικά με το δείκτη φιλικής επιφάνειας και το φυτικό συντελεστή μέσης περιόδου θερμοκηπιακής καλλιέργειας ρόκας σε Μεσογειακές συνθήκες.

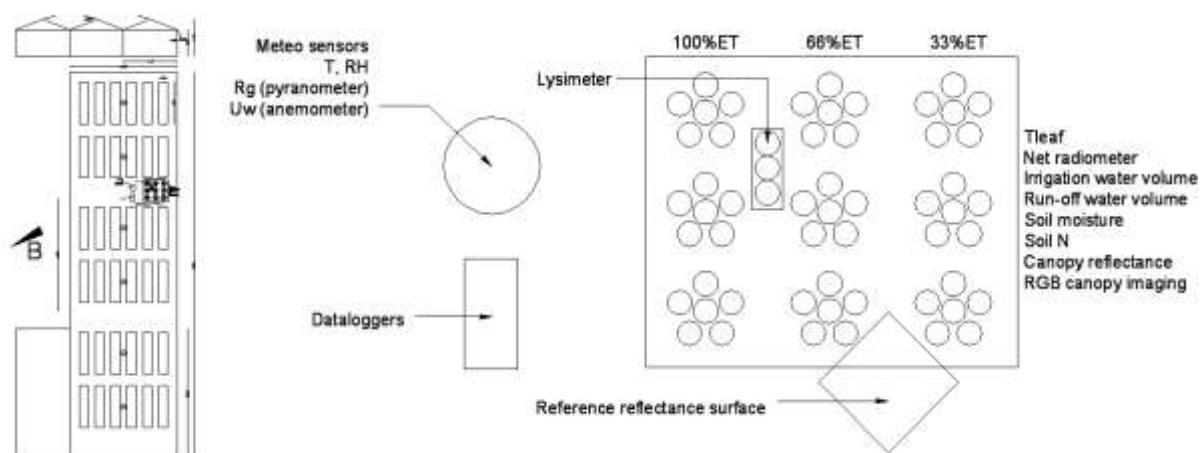
Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος

Θέση εγκατάστασης, υπόστρωμα και φυτικό υλικό

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε από Ιούνιο έως Αύγουστο του 2010, στο γυάλινο θερμοκήπιο AAT του ΤΕΙ Ηπείρου (αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασης και του εξοπλισμού έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο). Την περίοδο των μετρήσεων η

κουρτίνα σκίασης του θερμοκηπίου ήταν απλωμένη. Η χρήση τεχνικών σκίασης (κουρτίνα, δίκτυ, άσπρισμα) είναι συνηθισμένη στην περιοχή της Μεσογείου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Baille κ.α., 2001, Orgaz κ.α., 2005). Σημειώνεται ότι τα ανοίγματα αερισμού άνοιγαν όταν η θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερη από 22°C (Katsoulas κ.α., 2007).

Το πείραμα έγινε στο νότιο ανατολικό τμήμα του θερμοκηπίου (Εικόνα 54), στο επίπεδο του δαπέδου (όχι πάνω στους πάγκους).



Εικόνα 54 Πειραματική διάταξη στο θερμοκήπιο και όργανα μέτρησης παραμέτρων εναέριου περιβάλλοντος και καλλιέργειας: T, RH = αισθητήρες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα (δείκτες: o= εξωτερικό, i= εσωτερικό), RG = πυρανόμετρο (δείκτες: o= εξωτερικό, i= εσωτερικό)

Εγκαταστάθηκαν εννέα ομάδες των 7 γλαστρών 4 λίτρων (διαστάσεις σε cm, πάνω διάμετρος / κάτω διάμετρος / ύψος: 20/14/14). Κάθε ομάδα από γλάστρες τοποθετήθηκε σε ανεξάρτητη βάση με σκοπό την συλλογή του νερού απορροής. Από τις ομάδες αυτές διαμορφώθηκαν τρεις ανεξάρτητα αρδευόμενες (με σύστημα στάγδην) μεταχειρίσεις η κάθε μία από τις οποίες περιελάμβανε 3 ομάδες (Εικόνα 54). Έτσι προέκυψαν 3 επαναλήψεις για 3 μεταχειρίσεις. Τέλος μία ειδική ομάδα 3 γλαστρών τοποθετήθηκε πάνω σε λυσιμετρικό ζυγό.

Στο κάτω μέρος κάθε γλάστρας τοποθετήθηκε ένα στρώμα χαλικιών ύψους περίπου 2cm. Οι γλάστρες πληρώθηκαν με αμμοπηλώδες έδαφος (USA Soil Texture Classification - FAO paper56) αναμεμιγμένο με 20% λευκή τύρφη (Klasmann-Deilmann GmbH). Η υδατοικανότητα του μείγματος μετρήθηκε ίση με 0,315 m³/m³. Στην αρχή της περιόδου εφαρμόστηκε λίπασμα 6:15:13, (400 gr m⁻² BIO ILSA/Progress Micro).

Σπόροι ρόκας (*Eruca sativa* Mill., FytroSeeds/Rocket Commun 2) σπάρθηκαν απευθείας στην τελική θέση (γλάστρες) (1/6/2010) όπως είναι και η κοινή πρακτική

στην Ελλάδα (Pagoulitou, 2008). Μετά από την εγκατάσταση και την αραίωση της καλλιέργειας (30 ημέρες μετά τη σπορά) η συνολική πυκνότητα των φυτών ήταν 39,4 plants m⁻² και η σχέση κατακόρυφης προβολής της κόμης προς συνολικής έκτασης καλλιέργειας (συμπεριλαμβανομένων των διαδρόμων μεταξύ ομάδων) ήταν σχεδόν 51%. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε παραγωγικές μονάδες, η πυκνότητα των φυτών μπορεί να φτάσει και τα 1000 plants m⁻² (Nicola κ.α., 2005) αλλά σε ερευνητικές εγκαταστάσεις έχουν αναφερθεί διάφορες πυκνότητες (30, 100 και 200 plants m⁻² στους Padulosi, 1995, 3,5 plants m⁻² στον Fu, 2008 και 100 plants m⁻² στον Omirou, 2009).

Άρδευση

Η άρδευση γινόταν με σύστημα στάγδην. Τρεις αυτορυθμιζόμενοι ως προς την πίεση σταλάκτες παροχής 2,2 L h⁻¹ (Naan Dan) ο καθένας εγκαταστάθηκαν σε κάθε γλάστρα. Ο συντελεστής ομοιομορφίας του συστήματος (Christiansen, 1942) υπολογίστηκε ίσος με 96%. Ο έλεγχος της άρδευσης γινόταν μέσω ενός εμπορικού προγραμματιστή (Netafim Miracle AC 06). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και το pH του νερού άρδευσης ήταν 0,49 dS m⁻¹ και 6,8 αντίστοιχα. Το πρόγραμμα άρδευσης γίνονταν στην αρχή υποθέτοντας ένα φυτικό συντελεστή ίσο με τη μονάδα ($K_c = 1$) και στην συνέχεια ρυθμίζονταν με βάση μετρήσεις από το λυσίμετρο, τους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας και τις μετρήσεις απορροής (ο στόχος για την απορροή τέθηκε στο επίπεδο 5%).

Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της έλλειψης νερού στο έδαφος στα ανακλαστικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης: 33%, 66% και 100% της ET_c (όπως υπολογίζονταν από τα δεδομένα του λυσίμετρου), εφαρμόστηκαν επί 15 ημέρες κατά τη διάρκεια της μέσης περιόδου (mid-season) της καλλιέργειας (50 ημέρες μετά τη σπορά). Η συνολική ημερήσια ποσότητα νερού που αντιστοιχούσε σε κάθε μεταχείριση ήταν 660, 440 και 220 ml pot⁻¹ d⁻¹.

Συστήματα μέτρησης

Μετρήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι:

- θερμοκρασία (T_i σε °C) και σχετική υγρασία (RH_i σε %) αέρα μέσω δύο αισθητήρων T, RH τοποθετημένων εντός και εκτός του θερμοκηπίου (τύπος HD9008TR, DeltaOhm, Italy). Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας και του ελλείμματος πίεσης κορεσμού του αέρα (Allen κ.α., 1998),

- προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μέσα και έξω από το θερμοκήπιο ($R_{G,i}$ και $R_{G,o}$ σε $W\ m^{-2}$) μέσω δύο πυρανόμετρων (τύπος SKS 1110, Skye instruments, Powys, U.K.) εγκατεστημένων σε ύψος 2 m και 4,5m πάνω από το έδαφος αντίστοιχα,
- καθαρή ακτινοβολία κόμης canopy (R_n σε $W\ m^{-2}$) μέσω πυραδιόμετρου (τύπος LP-NET 07, DeltaOhm, Italy) εγκατεστημένου σε ύψος 0,75 m πάνω από την κόμη,
- θερμοκρασία φύλλου (T_l σε $^{\circ}C$) μέσω θερμοζευγών (Copper (PFA 0,01mm)-Constantan (PFA Teflon 0,01mm); OMEGA Engineering, USA), τα οποία ήταν κολλημένα στην κάτω πλευρά των φύλλων, ενώ η θερμοκρασία κόμης (T_c) υπολογιζόταν ως η μέση τιμή των τιμών από 5 τυχαία επιλεγμένα ώριμα και υγιή φύλλα,
- ο ρυθμός διαπνοής των φυτών (ET_{ly} σε g) μέσω ενός λυσιμετρικού ζυγού (τύπος 60000 G SCS, Presica, Dietikon, Switzerland, scale capacity = 62 kg, resolution $=\pm 1$ g) τοποθετημένου κοντά στο κέντρο της καλλιέργειας. Η συσκευή εκτός από τον ζυγό περιελάμβανε βάση για 4 γλάστρες με δυνατότητα συλλογής και απομάκρυνσης της απορροής καθώς και ανεξάρτητο αρδευτικό σύστημα. Η απώλεια βάρους που μετρούνταν από το ζυγό ανά μικρά χρονικά διαστήματα αντιστοιχούσε στην διαπνοή των φυτών.

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις συλλέγονταν σε ένα σύστημα καταγραφής (DL2e Logger, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις γίνονταν ανά 30 s και αποθηκεύονταν ο μέσος όρος 10 λέπτου.

Το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό (θ σε %v/v) μετρήθηκε με αισθητήρες επίδραση συχνότητας (τύπος 10HS-Large Volume Soil Moisture Sensor, Decagon Devices Inc. WA, USA) τοποθετημένου κατακόρυφα. Επομένως μετρούσαν το μέσο όρο υγρασίας για 10cm βάθους (μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας αυτό ήταν και το μέσο βάθος του ριζικού συστήματος). Οι μετρήσεις αυτές καταγράφονταν σε αυτόνομο καταγραφικό (Em50, Decagon Devices Inc. WA, USA), ενώ για τον υπολογισμό του θ χρησιμοποιήθηκε η γενική σχέση μετατροπής σήματος που παρέχονταν από τον κατασκευαστή για ανόργανα εδάφη.

Ο συντελεστής φυλλικής επιφάνειας (I_{LA} in $m^2\ leaf\ m^{-2}\ ground$) της καλλιέργειας εκτιμήθηκε μέσω καταστροφικών μετρήσεων μέσω σαρωτή (ScanJet 4850, HP, USA) της επιφάνειας των φύλλων δύο φυτών δειγμάτων τα οποία αντικαθιστούνταν από το απόθεμα φυτών. Τέτοιες μετρήσεις έγιναν δύο φορές κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου και συγκεκριμένα στις 25 Ιουλίου και στις 10 Αυγούστου και αφορούσαν μόνο την μεταχείριση 100% ET_c . Για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας εφαρμόστηκε η αριθμητική μέθοδος ολοκλήρωσης Monte-Carlo (Robert and Casella, 2005) στις σαρωμένες εικόνες (Εικόνα 55).



Εικόνα 55 Σαρωμένη εικόνα φύλλων για υπολογισμό δείκτη φυλλικής επιφάνειας

Ακόμη έγιναν ενδεικτικές μετρήσεις της στοματικής αγωγιμότητας (g_i σε $mm\ s^{-1}$) με χρήση πορομέτρου (τύπος AP4, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK).

Τέλος για την περίοδο από 25 Ιουλίου έως 10 Αυγούστου, κάθε ημέρα από 10:00 έως 18:00 γίνονταν μετρήσεις της ανάκλασης από την κόμη της καλλιέργειας με χρήση φορητού πολυφασματικού ραδιόμετρου (τύπος MSR87, CropScan Inc., Rochester, USA). Οι μετρήσεις αφορούσαν 8 στενές φασματικές περιοχές, κεντραρισμένες γύρω από τα μήκη κύματος 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810 nm. Το ραδιόμετρο ήταν εγκατεστημένο σε ύψος 1m πάνω από την κόμη και αυτό αντιστοιχούσε σύμφωνα με τον κατασκευαστή σε περιοχή δείγματος εμβαδού 0,20 m²). Οι μετρήσεις γίνονταν πάνω από συμπαγή φυλλική επιφάνεια και για τις τρεις μεταχειρίσεις άρδευσης. Κατά την περίοδο των μετρήσεων η θερμοκουρτίνα ήταν μαζεμένη.

Παρόλο που η τηλεπισκόπηση (επίγεια ή δορυφορική) εφαρμόζεται με επιτυχία εδώ και χρόνια σε αγρούς, δεν έχει μελετηθεί ακόμη σε μεγάλο βαθμό σε συνθήκες θερμοκηπίου. Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για τους αγρούς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν εντός του θερμοκηπίου κυρίως λόγω της πολύπλοκης κατάστασης που δημιουργείται από τις σκιάσεις εντός του θερμοκηπίου (από τα στοιχεία σκελετού και εξοπλισμού, Sarlikioti κ.α., 2010 και 2011). Με σκοπό τη διαχείριση της κατάστασης αυτής και της μείωσης της επίδρασης των σκιών στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε μία ειδική τεχνική με επιφάνεια αναφοράς (Nantt, 2009) η οποία παρουσιάστηκε σε προηγούμενα κεφάλαια (Εικόνα 56).



Εικόνα 56 Άποψη της καλλιέργειας με τη λευκή επιφάνεια αναφοράς για την ανάκλαση

Στο πλαίσιο της έρευνας που παρουσιάζεται, μελετήθηκαν κοινοί φυτικοί δείκτες που βασίζονταν σε μήκη κύματος στην περιοχή του ορατού με σκοπό την αξιολόγηση της σχέσης τους με την διαθεσιμότητα νερού στο υπόστρωμα, την εξατμισοδιαπνοή και την υδατική καταπόνηση. Οι δείκτες που αξιολογήθηκαν είναι οι ακόλουθοι (το R αντιστοιχεί στο ποσοστό ανάκλασης στην περιοχή του μήκους κύματος που φαίνεται στον δείκτη):

- SB – απλά μήκη κύματος (ανάκλαση σε κάθεάνα από τα διαφορετικά μήκη κύματος του πολυφασματικού ραδιόμετρου (460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810nm),
- SR – φυτικοί δείκτες απλών λόγων (όλοι οι διαθέσιμοι συνδυασμοί από τα μήκη κύματος που αναφέρθηκαν),
- τρεις επιλεγμένοι φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών (η επιλογή τους βασίστηκε στις σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές καθώς και στα πρώτα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των SB και SR):
 - $sPRI = (R_{560} - R_{510}) / (R_{560} + R_{510})$ (ένας δείκτης παρόμοιος με τον PRI-Physiological Reflectance Index, ο PRI χρησιμοποιεί την ανάκλαση στα 530 και 550 nm, αλλά αυτά τα μήκη κύματος δεν ήταν

διαθέσιμα στο όργανο που χρησιμοποιήθηκε και έτσι επιλέχθηκαν τα κοντινότερα διαθέσιμα μήκη κύματος,

- $sNDVI1 = (R810 - R710)/(R810 + R710)$ και
- $sNDVI2 = (R810 - R560)/(R810 + R560)$.

Δεδομένα από επιλεγμένες ημέρες αναλύθηκαν και η σύγκριση των μέσω έγινε μέσω ελέγχων t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95% με χρήση του Excel και του σχετικού Analysis Tools Package (Microsoft, USA).

Αποτελέσματα και συζήτηση

Μικροκλίμα θερμοκηπίου

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τις μέσες τιμές (για την περίοδο 10:00 – 18:00h τοπική ώρα) των κλιματικών παραμέτρων εντός και εκτός του θερμοκηπίου για την περίοδο των μετρήσεων.

Πίνακας 7 Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων εντός και εκτός του θερμοκηπίου για την περίοδο των μετρήσεων (στις παρενθέσεις δίνεται το τυπικό σφάλμα).

Περίοδος	T_i °C	RH_i %	VPD kPa	R_{Gi} $W\ m^{-2}$	T_o °C	R_{Go} $W\ m^{-2}$
Ιούνιος	34.00 (±4.59)	58.52 (±7.73)	2.72 (±0.98)	260.12 (±46.20)	27.03 (±4.50)	576.49 (±93.94)
Ιούλιος	38.83 (±1.75)	50.04 (±5.12)	4.28 (±0.60)	275.81 (±37.49)	30.57 (±1.64)	614.45 (±85.82)
Αύγουστος	38.86 (±2.41)	54.19 (±5.28)	3.44 (±0.83)	268.85 (±16.19)	31.36 (±2.16)	588.95 (±34.91)

όπου: T_i , RH_i και VPD η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και το έλλειμμα πίεσης κορεσμού εντός του θερμοκηπίου, R_{Gi} η εσωτερική προσπίπτουσα ακτινοβολία, T_o η εξωτερική θερμοκρασία αέρα και R_{Go} η εξωτερική προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Παραγωγή φύλλων δείκτης φυλλικής επιφάνειας, albedo και στοματική αγωγιμότητα

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας υπολογίστηκε όταν η καλλιέργεια εισήλθε στην περίοδο συγκομιδής (5-8 ώριμα φύλλα ανά φυτό, σύμφωνα με τον Ομίρου (2009)). Ο I_{LA} βρέθηκε ίσος με $0,63 (\pm 0,21) m^2\ m^{-2}$, με $216,56 (\pm 6,71) leafs\ m^{-2}$. Ο F_u (2008)

βρήκε τιμές I_{LA} από 0,26 έως 0,62 σε πειράματα εντός θερμοκηπίου, αλλά οι Janssens κ.α. (2005) ανέφεραν μέγιστες τιμές I_{LA} ίσες με $2,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ για καλλιέργεια ρόκας σε αγρούς στην Βραζιλία. Οι Seema κ.α. (2004) υποστηρίζουν ότι κάτω από συνθήκες έλλειψης υγρασίας εδάφους υπάρχει μία μείωση της φυλλικής επιφάνειας της ρόκας αλλά αυτή δεν έχει σημαντικά στατιστική διαφορά σε σχέση με την φυλλική επιφάνεια στα επαρκώς αρδευόμενα φυτά.

Η μέση τιμή (από 10:00 έως 18:00 τοπική ώρα) της λευκαύγειας (albedo, λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από την κόμη) υπολογίστηκε ίση με 0,19 ($\pm 0,06$).

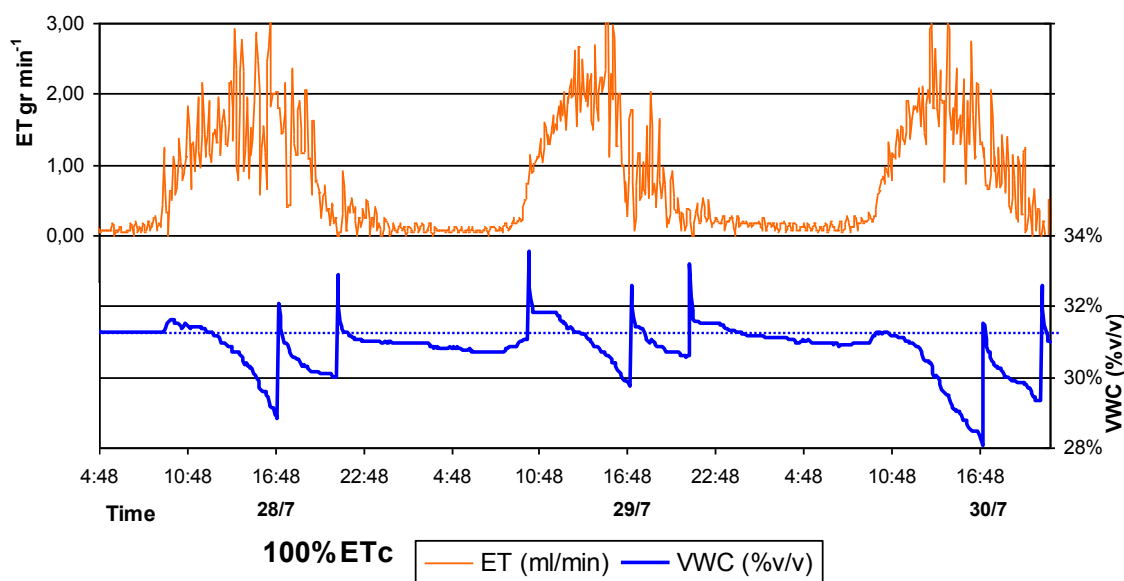
Η μέση στοματική αγωγιμότητα (από 10:00 έως 18:00 τοπική ώρα) υπολογίστηκε ίση με $3,28 (\pm 0,94) \text{ mm s}^{-1}$ (η σχετική μέση εισερχόμενη ακτινοβολία που μετρήθηκε πάνω από την κόμη της καλλιέργειας ήταν $259,60 \text{ W m}^{-2}$).

Το βάρος φρέσκων φύλλων (ολική κοπή στο τέλος Αυγούστου) ήταν $1035 (\pm 94) \text{ g m}^{-2}$. Στη βιβλιογραφία βρέθηκαν διάφορα επίπεδα παραγωγής. Οι Nicola κ.α. (2003) αναφέρουν 900 g m^{-2} για καλλιέργεια σε χώμα σε γυάλινο θερμοκήπιο ενώ οι Nicola κ.α. (2005) αναφέρουν 2182 g m^{-2} για υδροπονική καλλιέργεια σε γυάλινο θερμοκήπιο. Όπως αναφέρθηκε ήδη, διαφορετικές παροχές νερού (μεταχειρίσεις 33%, 66% και 100%ET_o) εφαρμόστηκαν μόνο για 15 ημέρες με σκοπό την μέτρηση της ανάκλασης από την κόμη σε διαφορετικά επίπεδα εδαφικής υγρασίας. Η μέση παραγωγή από τις αντίστοιχες ομάδες γλαστρών ήταν 994, 1019 και 1078 g m^{-2} . Η εφαρμογή ελέγχου t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95% έδειξε ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων αυτών, γεγονός που αποτελεί μία πρώτη ένδειξη καλής απόκρισης της ρόκας υπό καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης.

Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και φυτικός συντελεστής

Οι μελέτες σχετικά με τις ανάγκες λαχανοκομικών καλλιεργειών σε θερμοκήπια σε Μεσογειακό κλίμα δεν καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις και έτσι η άρδευση προγραμματίζεται κυρίως με βάση την εμπειρία των αγροτών (Orgaz κ.α., 2005). Σύμφωνα με τους Allen κ.α. (1998) στην προσέγγιση του απλού φυτικού συντελεστή ο λόγος της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και αυτής μίας καλλιέργειας αναφοράς (που προσομοιάζει με χλοοτάπητα, ET_o) συνδυάζεται για την εξαγωγή ενός φυτικού συντελεστή (K_c). Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) υπολογίζεται σύμφωνα με την προσέγγιση FAO Penman-Monteith. Οι επιδράσεις των χαρακτηριστικών που διαφοροποιούν τις διάφορες καλλιέργειες από την καλλιέργεια αναφοράς συγκεντρώνονται στο φυτικό συντελεστή, ενώ οι επιδράσεις των κλιματικών συνθηκών εκφράζονται μέσω του υπολογισμού της ET_o. Έτσι καθώς η

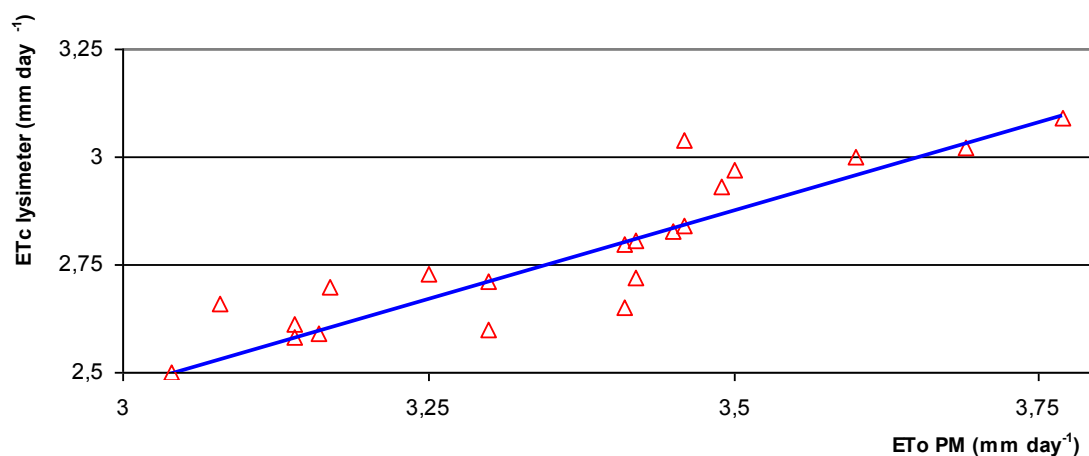
ET_c αντικατοπτρίζει την κλιματική ζήτηση ο K_c μεταβάλλεται κυρίως εξαιτίας των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας (και μόνο σε ένα πολύ μικρό βαθμό από το κλίμα). Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις που σχετίζονται με σχεδιασμό, προγραμματισμό και διαχείριση αρδευτικών συστημάτων. Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι η ET_c αντιπροσωπεύει το πάνω όριο της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (δυννητική) υπό συνθήκες που δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην εξατμισοδιαπνοή και την ανάπτυξη της καλλιέργειας λόγω μειωμένων αποθεμάτων νερού, πυκνότητας φύτευσης, τροφοπενιών, αλατότητας, ασθενειών, εντόμων, ζιζανίων κ.ο.κ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ καλλιεργειών στον αγρό και στο θερμοκήπιο. Σε κάθε περίπτωση όμως, εάν δεν υπάρχουν σημαντικές αυξομειώσεις του I_{LA} ούτε τεχνικές ρυθμίσεις της θερμοκρασίας (π.χ. με χρήση συστήματος θέρμανσης) ή του ελλείμματος πίεσης υδρατμών (π.χ. με χρήση υδρονέφωσης), ο κοινός K_c , όπως περιγράφεται στο FAO paper 56 (Allen et. al. 1998) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα θερμοκήπια (Fernandez, 2010).



Εικόνα 57 Υγρασία εδάφους (VWC σε m^3m^{-3}) και μετρημένη εξατμισοδιαπνοή, ET_{lys} ($ml\ min^{-1}$) για τη μεταχείριση $100\%ET_c$. Η γραμμή με κουκκίδες αντιστοιχεί στην υδατοικανότητα.

Με βάση μετρήσεις λυσιμετρικού ζυγού (Allen κ.α., 1998, Allen κ.α., 2001α, Allen κ.α., 2001β) ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας (T_r) και ο σχετικός K_c εκτιμήθηκαν κατά τη μέση καλλιεργητική περίοδο (Allen κ.α., 1998). Ο T_r κυμάνθηκε μεταξύ 2,45 kg και 3,11 $kg\ m^{-2}\ day^{-1}$ (Εικόνα 57). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 58 η γραμμική σχέση μεταξύ μετρημένης εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και υπολογισμένης

εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (Penman – Monteith), αντιστοιχεί σε ένα απλό φυτικό συντελεστή ίσο με 0,82 ($R^2=0,88$).



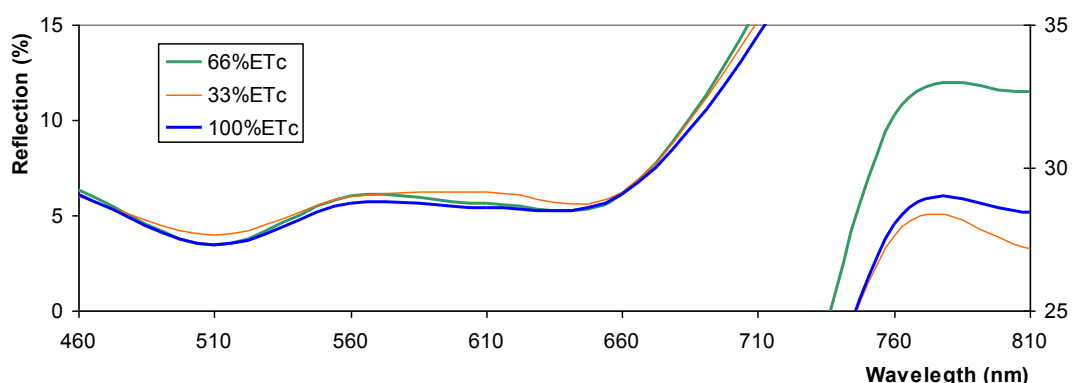
Εικόνα 58 Γραμμική σχέση μεταξύ μετρημένης (μέσω του λυσίμετρου) εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας και υπολογισμένης εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (Penman – Monteith)

Διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος, υδατική κατάσταση των φυτών και δείκτες ανάκλασης

Τρεις διαφορετικές υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 66%ET_c and 33%ET_c) εφαρμόστηκαν για 15 ημέρες σε διαφορετικές ομάδες γλαστρών της καλλιέργειας. Το αντίστοιχο μέσο περιεχόμενο του χώματος σε νερό για τις τρεις μεταχειρίσεις ήταν 0,311 (±0,010), 0,259 (±0,012) και 0,197 (±0,017). Ακόμη το μέσο νιτρικό άζωτο στο έδαφος κατά την ίδια περίοδο εκτιμήθηκε στα 25 mg l⁻¹ NO₃⁻ (η εκτίμηση έγινε με Merkoquant® N test strip (Merck KGaA, Darmstadt, Germany) με βάση τη μέθοδο που προτείνεται από την USDA (1999)).

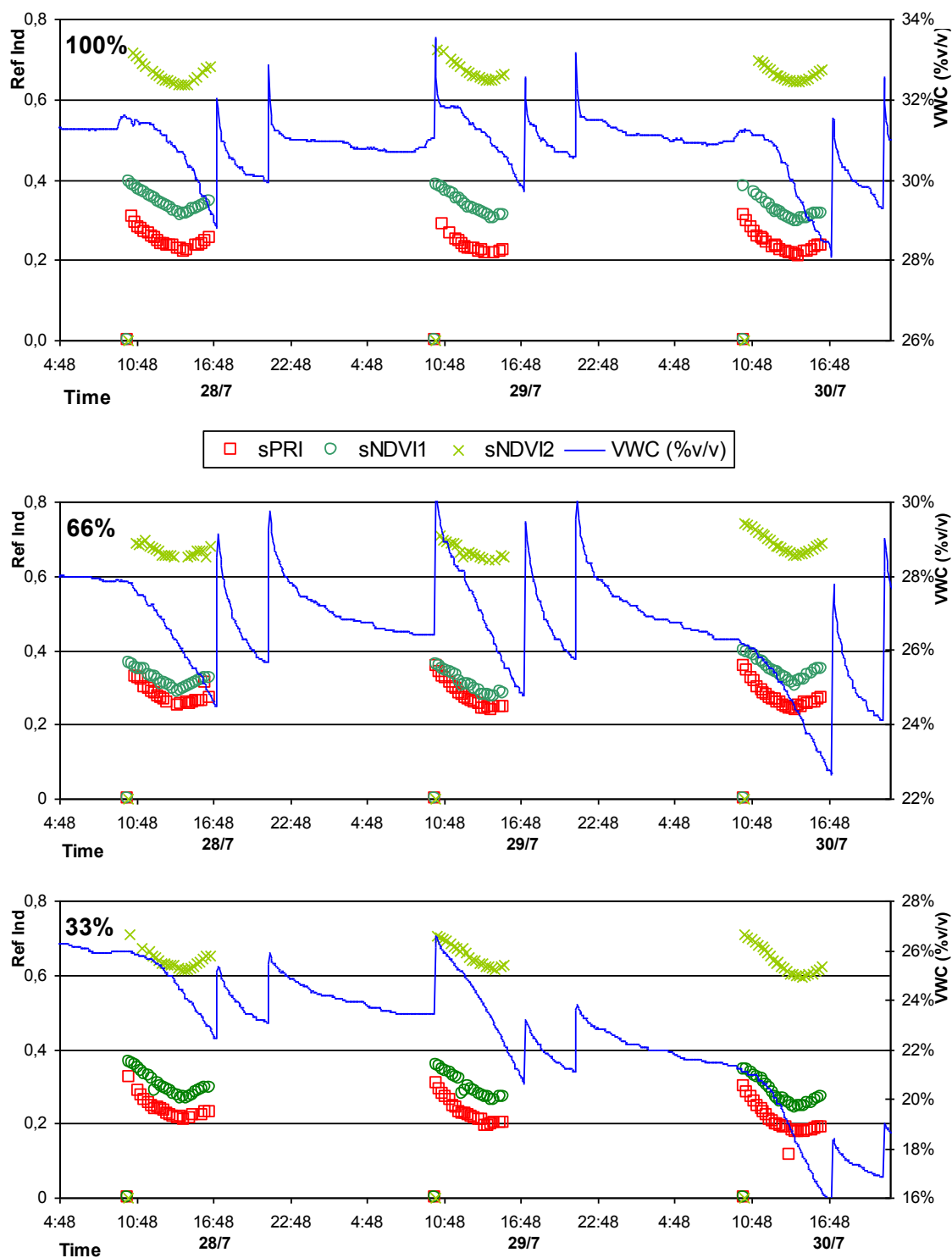
Στην Εικόνα 59 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά φάσματα πάνω από κόμη καλλιέργειας ρόκας κατά τη διάρκεια μίας χαρακτηριστικής ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας (30/7, μέσες τιμές για 10:00-18:00 τοπική ώρα). Είναι προφανές –και η στατιστική ανάλυση επιβεβαιώνει μια ισχυρή θετική συνδιακύμανση- ότι όλες οι καμπύλες μεταβάλλονται με ένα παρόμοιο τρόπο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 59 η ανάκλαση είναι εντονότερη για τις μεταχειρίσεις υπό καταπόνηση στην περιοχή των 500nm (Knipling, 1970), 620nm (Cure κ.α., 1989) και 710nm (Nantt, 2009). Για τα μήκη κύματος 710 και 810nm το φάσμα ανάκλασης της περισσότερο καταπονημένης μεταχείρισης (33%ET_c) είναι λιγότερο έντονο, όπως και αναμενόταν (Nantt, 2009)-

αλλά τα φάσματα που αντιστοιχούν στις μεταχειρίσεις 66%ET_c και 100%ET_c αντιστρέφουν τη σχέση τους.

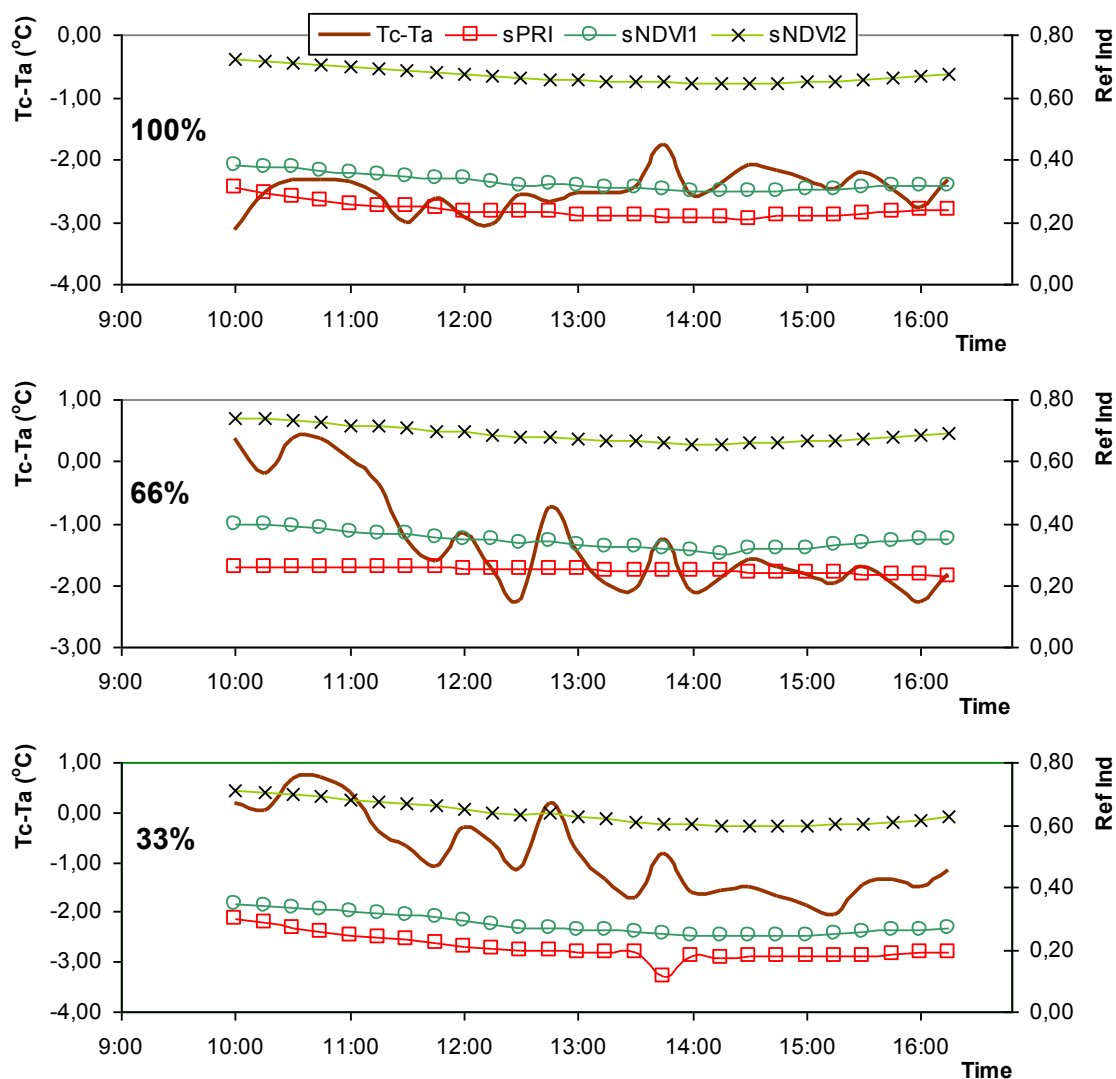


Εικόνα 59 Χαρακτηριστικά φάσματα ανάκλασης από κόμη καλλιέργειας ρόκας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c) κατά τη διάρκεια μίας καλοκαιρινής ημέρας στο μέσο του καλοκαιριού (30/7). Οι καμπύλες για τα 760 και τα 810nm αναφέρονται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα.

Στην Εικόνα 60 παρουσιάζονται οι πορείες κατά τη διάρκεια της ημέρας (για τρεις συνεχόμενες ηλιόλουστες καλοκαιρινές ημέρες) επιλεγμένων φασματικών δεικτών ανάκλασης (sPRI, sNDVI1 και sNDVI2) πάνω από την κόμη των τριών μεταχειρίσεων. Οι τρεις μεταχειρίσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα θ (m³m⁻³). Κατά τη διάρκεια κάθε ημέρας οι φασματικοί δείκτες έχουν μία αντίστροφη σχέση με την ET_c (διαθέσιμα δεδομένα μόνο για την μεταχείριση 100%ET_c -Εικόνα 57). Ακόμη μπορεί να γίνει αντιληπτό (Εικόνα 60) ότι τόσο ο sPRI όσο και οι sNDVI1 και 2 είχαν μικρότερες τιμές για την μεταχείριση 33%ET_c σε σύγκριση με τις άλλες μεταχειρίσεις (Penñelas κ.α., 1994). Η τάση και για τους τρεις φασματικούς δείκτες είναι πτωτική καθώς περνούν οι ημέρες υπό διαφορετικά καθεστώτα άρδευσης και η θ του εδάφους μετακινείται προς χαμηλότερα επίπεδα για τις μεταχειρίσεις 66%ET_c και 33%ET_c. Η αντίδραση αυτή είναι περισσότερο έντονη για τις μεταχειρίσεις 100%ET_c και 33%ET_c. Έγινε ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης με σκοπό τη συσχέτιση του VWC (για όλες τις μεταχειρίσεις), ET_{lys} (μόνο για την μεταχείριση 100%ET_c) και όλων των SB, SR αλλά και των περισσότερο πολύπλοκων δεικτών που αξιολογήθηκαν. Οι μόνες αποδεκτές σχέσεις ήταν αυτές μεταξύ του θ και της ανάκλασης στα 710nm ($R^2=0,73$, $0,76$ και $0,74$ για τις μεταχειρίσεις 100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c αντίστοιχα) και μεταξύ θ και sNDVI2 για την μεταχείριση 33%ET_c ($R^2=0,68$).



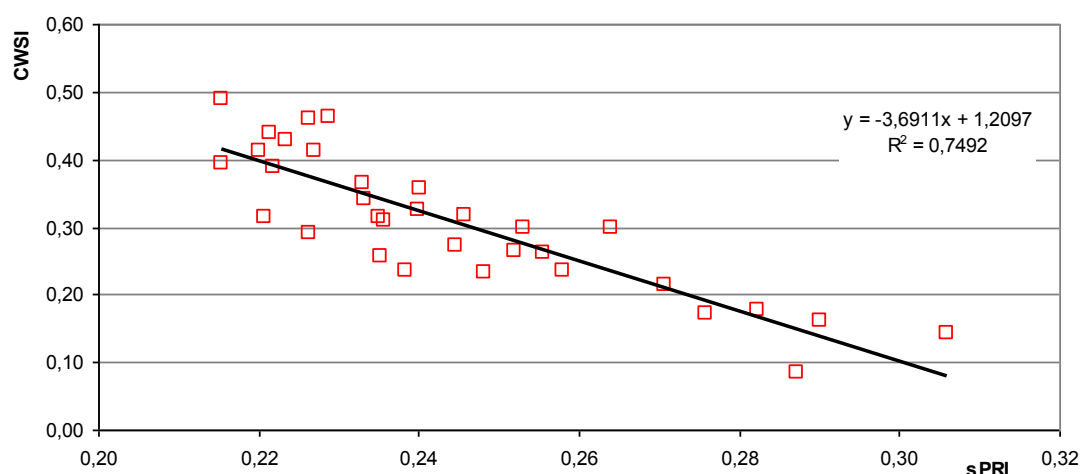
Εικόνα 60 Υγρασία εδάφους (VWC σε m^3m^{-3}) και δείκτες ανάκλασης πάνω από καλλιέργεια ρόκας ως προς το χρόνο (για τρεις συνεχόμενες ηλιόλουστες ημέρες στο μέσο του καλοκαιριού, 28-30/7) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c).



Εικόνα 61 Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ κόμης και αέρα (T_c-T_i) και δείκτες ανάκλασης πάνω από καλλιέργεια ρόκας ως προς το χρόνο (για μία ηλιόλουστη ημέρα στο μέσο του καλοκαιριού, 30/7) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c).

Η διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας αέρα και κόμης έχει συσχετιστεί από αρκετούς ερευνητές με την υδατική καταπόνηση των φυτών (Idso κ.α., 1997; Ajayi και Olufayo, 2004; Erdem, 2010; Widmoser, 2010). Η Εικόνα 61 παρουσιάζει την χρονική μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας κόμης – αέρα ($\Delta T = T_c - T_{air}$) για την ίδια ημέρα (30/7) αλλά και τις σχετικές μεταβολές των φασματικών δεικτών sPRI, sNDVI1 και sNDVI2. Οι μέσες τιμές της ΔT ήταν -2,51, -1,30 και -0,87°C για τις μεταχειρίσεις 100%ET_c (αναφορά), 66%ET_c και 33%ET_c αντίστοιχα, όταν οι σχετικές μέγιστες αρνητικές ήταν -3,14, -2,28 και -2,05 °C. Είναι φανερό και από τις δύο γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 60 και Εικόνα 61) ότι όλοι οι δείκτες παρουσιάζουν μία σχετική

μείωση το μεσημέρι όταν η ζήτηση για νερό είναι εντονότερη. Η εφαρμογή ελέγχου t-student σε επίπεδο σημαντικότητας 95% έδειξε ότι για όλα τα SB, SR και δείκτες που αξιολογήθηκαν, οι μέσες τιμές ήταν σημαντικά διαφορετικές όταν γινόταν σύγκριση μεταξύ καλά και μέσα αρδευόμενες μεταχειρίσεων (100%ET_c και 66%ET_c) και της πιο καταπονημένης μεταχείρισης (33%ET_c). Από την άλλη πλευρά οι τιμές για τις μεταχειρίσεις 100%ET_c και 66%ET_c δεν διέφεραν σε σημαντικό επίπεδο. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η ανάκλαση στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ακτινοβολίας έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει υδατική καταπόνηση μόνο όταν υπάρχει μία σχετικά μεγάλη διαφορά στην διαθεσιμότητα νερού. Σε παρόμοια αποτελέσματα (για άλλες καλλιέργειες) έχουν καταλήξει και οι Hunt και Rock (1989), Riggs κ.α. (1991), Penñelas κ.α. (1993) και Inoue και Penñelas (2006).



Εικόνα 62 Σχέση μεταξύ sPRI και CWSI για τη μεταχείριση 100%ET_c.

Στην Εικόνα 62 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ sPRI και CWSI για τη μεταχείριση 100%ET_c. Ο CWSI (0: όχι υδατική καταπόνηση; 1: μέγιστη υδατική καταπόνηση) υπολογίστηκε σύμφωνα με τα προτεινόμενα από τους Jackson κ.α. (1981) (βλέπε επίσης Katsoulas κ.α., 2002). Όσο η υδατική καταπόνηση αυξάνεται, ο sPRI ελατώνεται. Αυτό το εύρημα βρίσκεται σε συμφωνία με τη τα συμπεράσματα των Sarlikioti κ.α. (2010), οι οποίοι δείχνουν ότι ο PRI, είναι αντιστρόφως ανάλογος με την αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας. Η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε μία αποδεκτή γραμμική σχέση ($R^2 = 0,74$) μεταξύ sPRI και CWSI. Σε κάθε περίπτωση όμως η χρήση αυτής της σχέσης για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης και τον έλεγχο της άρδευσης μέσα σε θερμοκήπια δημιουργεί προβληματισμό καθώς η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τόσο τον PRI (Sarlikioti κ.α., 2010) όσο και τον CWSI (Katsoulas, 2002).

Στο πλαίσιο της έρευνας έγινε προσπάθεια να αξιολογηθεί και η δυνατότητα χρήσης του απλούστερου δυνατού αισθητήρα καταγραφής ανάκλασης: μίας ηλεκτρονικής φωτογραφικής μηχανής (8 megapixel, single, charged couple device (CCD) chip, Olympus (FE-370 digital full frame camera using a 35-mm camera equivalent focal length of 36 mm) που καταγράφει εικόνες 3264 x 2448 pixel στα 72dpi, όσο αφορά την πιθανή συσχέτιση με την υδατική καταπόνηση (Εικόνα 63). Στο πλαίσιο αυτό έχουν δημοσιευτεί κάποια ενθαρρυντικά αποτελέσματα (Zalaluk, 2008). Η αξιολόγηση που έγινε στην υπό μελέτη περίπτωση δεν έδειξε κάποια αποδεκτή τάση ή συσχέτιση.



Εικόνα 63 Φωτογραφία κόμης ρόκας (στη θέση του πολυφασματικού ραδιόμετρου) υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c) στις 13:00 (τοπική ώρα) μίας ηλιόλουστης ημέρας στη μέση του καλοκαιριού (30/7)

Συμπεράσματα

Μετρήσεις με χρήση λυσιμετρικού ζυγού έδειξαν ότι ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής για τη μέση περίοδο θερμοκηπιακής καλλιέργειας ρόκας κυμάνθηκε μεταξύ 2,45 kg και 3,11 kg m⁻² day⁻¹ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ο αντίστοιχος απλός φυτικός συντελεστής (K_c) για το δεδομένο I_{LA} υπολογίστηκε με βάση τις διαδικασίες που ορίζονται στο FAO paper 56 (Allen κ.α., 1998) βρέθηκε ίσος με 0,82 (R²=0,88). Η πληροφορία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από αγρότες στο πλαίσιο διαμόρφωσης απλών προγραμμάτων άρδευσης για θερμοκηπιακή καλλιέργεια ρόκας.

Περιορισμένη άρδευση –σε δύο επίπεδα- εφαρμόστηκε για 15 ημέρες (έτσι προέκυψαν τρεις υδατικές μεταχειρίσεις: 100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c) με σκοπό την αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ δεικτών ανάκλασης και υδατικής καταπόνησης. Βρέθηκε ότι οι δείκτες ανάκλασης που μελετήθηκαν είχαν μία αντίστροφη σχέση με την ET_c (δεδομένα διαθέσιμα μόνο για τη μεταχείριση 100%ET_c). Ακόμη έγινε φανερό

ότι για όλες τις μεταχειρίσεις, όλοι οι σύνθετοι υπό αξιολόγηση δείκτες (sPRI, SNDVI 1 και 2) παρουσιάζουν μείωση γύρω από το μεσημέρι όταν η ζήτηση για νερό γίνεται περισσότερο έντονη, αλλά στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρχαν μόνο μεταξύ των μεταχειρίσεων 100%ET_c και 33%ET_c και 66%ET_c και 33%ET_c. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η ανάκλαση στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ακτινοβολίας έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει υδατική καταπόνηση μόνο όταν υπάρχει μία σχετικά μεγάλη διαφορά στην διαθεσιμότητα νερού.

Ακόμη παρατηρήθηκε μία τάση μείωσης για όλους τους σύνθετους δείκτες που αξιολογήθηκαν όσο οι ημέρες υπό καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης (για τις μεταχειρίσεις 66%ET_c και 33%ET_c) περνούν και η θ πέφτει σταδιακά σε χαμηλότερα επίπεδα.

Ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε ανεκτές σχέσεις μεταξύ του θ και της ανάκλασης στα 710nm ($R^2=0,73$, 0,76 και 0,74 για τις μεταχειρίσεις 100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c αντίστοιχα) και μεταξύ θ και SNDVI2 για την μεταχείριση 33%ET_c ($R^2=0,68$). Ακόμη η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε μία αποδεκτή γραμμική σχέση ($R^2 = 0,74$) μεταξύ sPRI και CWSI.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ διαθεσιμότητας νερού, υδατικής κατάστασης και φασματικών δεικτών ανάκλασης στην περιοχή του ορατού.

Κεφάλαιο 8 – Χρήση αισθητήρων μέτρησης υδατικών επιπέδων υποστρώματος για προγραμματισμό αρδεύσεων στο πλαίσιο υδροπονικών θερμοκηπιακών καλλιεργειών

Η χρήση παραμέτρων που σχετίζονται με το υπόστρωμα (βασική συνιστώσα του συνεχούς ατμόσφαιρα – φυτό - υπόστρωμα) αποτελεί μία αξιόπιστη λύση σχετικά με τη διαχείριση της άρδευσης (Pardossi κ.α., 2009). Σχετικοί αισθητήρες μπορούν να ενταχθούν σε αυτόματα συστήματα, παρέχοντας ενδείξεις που σηματοδοτούν την έναρξη της άρδευσης αλλά και τον καθορισμό της αρδευτικής δόσης. Στην πράξη, και με κύριο στόχο την αποφυγή μείωσης του διαθέσιμου νερού κάτω από ένα ορισμένο κρίσιμο επίπεδο μεταξύ των αρδευτικών γεγονότων, οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές αφορούν αισθητήρες μέτρησης:

- του υδατικού δυναμικού του υποστρώματος (soil matric potential - SMP),
- της διαθέσιμης υγρασίας (available soil water content – θ) και
- της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού στο υπόστρωμα (soil water electric conductivity – EC)

Το αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού εστιάζει στην παρουσίαση αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος (κυρίως υγρασίας) και την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης διαθέσιμης υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο υπόστρωμα σε υδροπονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες και κυρίως στη δυνατότητα συνδυασμού τους με τους ποιο κοινούς τρόπους διαχείρισης της άρδευσης σε αυτές: το χρονικό προγραμματισμό και τον έλεγχο μέσω συσσώρευσης προσπίπτουσας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας.

Αξιολόγηση εφαρμογής αισθητήρων μέτρησης υγρασίας σε υποστρώματα υδροπονίας

Όταν χρησιμοποιούμε αισθητήρες διηλεκτρικής χωρητικότητας, το μετρούμενο σήμα (mV ή V) μετατρέπεται τελικά σε περιεκτικότητα κατά όγκο σε υγρασία (θ % v/v), ώστε να έχει πρακτική χρήση. Τα ζητήματα που τίθενται είναι τα ακόλουθα:

1. Ποια πρέπει να είναι τα κατασκευαστικά και μετρητικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ώστε να δίνει την ακριβέστερη δυνατή μέτρηση (εύρος μετρήσεων, ανάλυση, ακρίβεια, ταχύτητα απόκρισης σε αλλαγές υγρασίας, μικρή επιρροή από αλατότητα, εύκολη βαθμονόμηση για το κάθε υπόστρωμα, διαμόρφωση

- και ύψος αιχμών ή ακίδων και βάσης επαφής, όγκος δείγματος, ανθεκτικότητα αιχμών και ακίδων, εύκολη εγκατάσταση και μεταφορά, κοκ).
2. Ποιες παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την τοποθέτηση του αισθητήρα ώστε να δίνει το αντιπροσωπευτικότερο δυνατό σήμα:
- Θέση τοποθέτησης (απόσταση και διεύθυνση) ως προς φυτά, σταλάκτες, σπές απορροής, ροή νερού κοκ.
 - Θέση τοποθέτησης ως προς ύψος υποστρώματος (από πάνω και έως ποιο βάθος, από πάνω αλλά μέτρηση από κάποιο βάθος και κάτω (όχι από την κορυφή), από το πλάι σε κάποιο ύψος, υπό γωνία).
 - Χρόνος λήψης μετρήσεων ως προς αρδευτικά γεγονότα.

Η διερεύνηση που παρουσιάζεται στην συνέχεια αφορά την δυνατότητα αξιοποίησης κοινά χρησιμοποιούμενων αισθητήρων διηλεκτρικής χωρητικότητας (FD και ADR), όπως ο EC5 (Decagon), ο 10HS (Decagon), ο ThetaProbe (Delta T) και ο WCM-Control (Grodan), για τη διαχείριση της άρδευσης σε κοινά υποστρώματα υδροπονίας (πετροβάμβακας Grodan Expert και περλίτης ISOCON Perloflor Hydro 1).

Ειδικές διαμορφώσεις και τεχνικές στο πλαίσιο του πειράματος

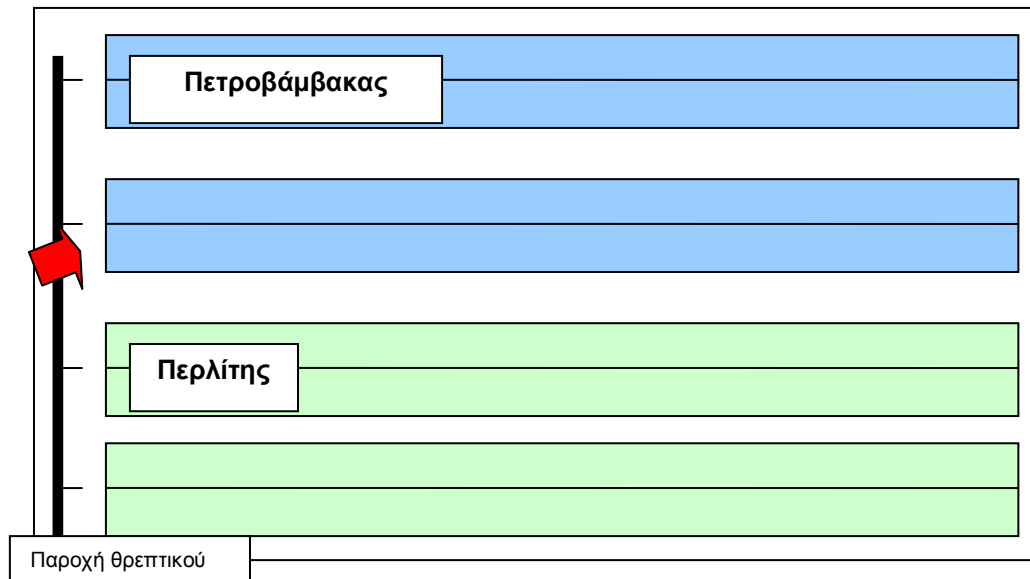
Θερμοκήπιο και καλλιέργεια

Οι μετρήσεις έγιναν από Φεβρουάριο έως Μάιο του 2011 σε ένα από τα θερμοκήπια (GR_01) του Εργαστηρίου Γ. Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που βρίσκεται στο αγρόκτημα της Σχολής Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο. Η γενική περιγραφή του θερμοκηπίου (είχε εμβαδόν 160m²) έχει γίνει στο κεφάλαιο υλικών, τεχνικών και μεθόδων.

Η μέση περατότητα του πλαστικού φιλμ κάλυψης κατά την περίοδο μετρήσεων βρέθηκε ίση με 75%. Όσο αφορά τον αερισμό, τόσο το άνοιγμα οροφής όσο και τα πλαϊνά ανοίγματα, άνοιγαν όταν η θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερη από 30°C και 21°C αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στα πλαϊνά ανοίγματα ήταν εγκατεστημένο εντομοστεγανό δίχτυ. Το όριο για τη θερμοκρασία ημέρας είχε οριστεί στους 15°C για το αερόθερμο και στους 14°C για την επιδαπέδια θέρμανση ενώ το όριο για τη θερμοκρασία νύχτας ήταν 10°C και για τα δύο συστήματα. Ο αναμικτήρας αέρα λειτουργούσε όταν η υγρασία ήταν πάνω από 75% την ημέρα και 50% την νύχτα.

Όσο αφορά την καλλιέργεια, ήταν τομάτα (*Lycopersicon esculentum*, var. Belladonna) σε περλίτη και πετροβάμβακα (τοποθέτηση με κύβο μεταφύτευσης πετροβάμβακα και στις δύο περιπτώσεις). Υπήρχαν 4 κανάλια με σάκους περλίτη και 4 κανάλια με σάκους πετροβάμβακα (Εικόνα 64). Σε κάθε κανάλι ήταν τοποθετημένοι

17 σάκοι. Στους μισούς σάκους υπήρχαν 2 και στους άλλους μισούς 3 φυτά τομάτας (στην περίπτωση αυτή η απόσταση φύτευσης ήταν 33cm). Η συνολική πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,125 φυτά m⁻².



Εικόνα 64 Σκαρίφημα της κάτοψης του θερμοκηπίου και εικόνα κατά την περίοδο της καλλιέργειας (3/2011, κόκκινο βέλος γωνία λήψης φωτογραφίας).

Εφαρμόστηκε ανοικτό υδροπονικό σύστημα. Η άρδευση γινόταν με θρεπτικό διάλυμα με χαρακτηριστικά³³: pH 5,5 και EC 2,4 dS m⁻¹ (οι τιμές αυτές βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων για υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (Li κ.α., 2001, Lizarraga κ.α., 2003, Lee, 2010)). Χρησιμοποιήθηκε σύστημα στάγδην άρδευσης με αυτό-ρυθμιζόμενους σταλάκτες παροχής 2l h⁻¹. Εκτιμήσεις ομοιομορφίας του συστήματος σύμφωνα με την μεθοδολογία σχετικών προδιαγραφών (ASAE, 1996) κατέγραψαν τιμές του CU της τάξης του 95%. Τοποθετήθηκε ένας σταλάκτης ανά φυτό. Το σύστημα παρασκευής θρεπτικού διαλύματος και ελέγχου συστημάτων ήταν το MACQU (Geomations A.E.).

Υποστρώματα

Τα υποστρώματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο των μετρήσεων ήταν τα:

- περλίτης (ISOCON Perloflor Hydro 1, διαστάσεις σάκου: μήκος 1m, ύψος 16cm, πλάτος 24cm) και
- πετροβάμβακας (Grodan Expert, διαστάσεις σάκου: μήκος 1m, ύψος 7,5cm, πλάτος 15cm).

Η τοποθέτηση των υποστρωμάτων έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή (ο πετροβάμβακας τοποθετήθηκε με την πλευρά που υποδεικνύεται ως επάνω, έγινε μεταφύτευση και εγκατάσταση του αρδευτικού, ακολούθησε άρδευση με σκοπό τον κορεσμό (να γεμίσει με νερό το υπόστρωμα) και μετά από 48 ώρες έγιναν τομές απορροής ανά διαστήματα και όσο το δυνατόν χαμηλότερα, πρακτικά στη βάση κάθε σάκου). Όσο αφορά τις Χ.Κ.Υ., στη βιβλιογραφία βρέθηκαν αναφορές και για τα δύο υποστρώματα που μελετώνται. Σχετικά δεδομένα περιλαμβάνονταν στη σειρά των εργασιών των Milks κ.α. (1989α, β και γ) (Εικόνα 65). Οι Al Naddaaf κ.α. (2011) παρέχουν Χ.Κ.Υ. για Ελληνικό περλίτη υδροπονίας παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις (Εικόνα 65). Η εξίσωση (σύμφωνα με το μοντέλο van Genuchten) είναι η:

$$\theta = 44,36 + \frac{27,58}{\left[1 + (0,33 \cdot Suction)^{2,29}\right]^{0,56}}$$

Εξίσωση 24 Χ.Κ.Υ. για Ελληνικό περλίτη υδροπονίας

όπου: θ η υγρασία (v/v %) και Suction η μύζηση σε cm στήλης νερού

³³ Τα αντίστοιχα όρια της μηχανής παρασκευής θρεπτικού διαλύματος (γινόταν σε κάθε άρδευση) ήταν 4,5-6,8 για το pH και 1,8-4 για την EC.

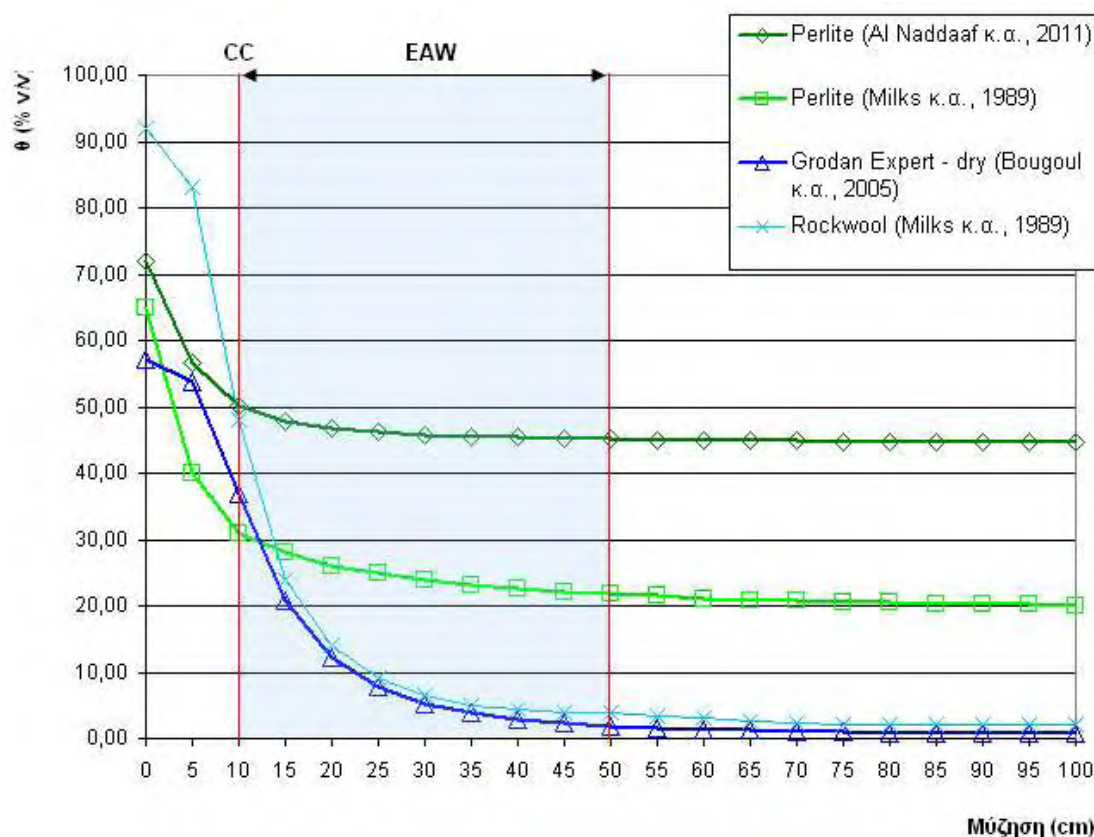
Για τον πετροβάμβακα δεδομένα που αφορούν ακριβώς τον τύπο πετροβάμβακα που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις (Grodan Expert) βρέθηκαν στην εργασία των Bougoul κ.α. (2005) (Εικόνα 65). Η εξίσωση για ύγρανση και κατανάλωση (σύμφωνα με το μοντέλο van Genuchten) είναι οι:

$$\text{κατ.: } \theta = \left\{ 0,0037 + \frac{0,567}{\left[1 + (0,096 \cdot \text{Suction})^{3,299} \right]^{0,697}} \right\} \cdot 100\% \quad \text{Εξίσωση 25 Χ.Κ.Υ. για πετροβάμβακα}$$

$$\text{υγρ.: } \theta = \left\{ 0,0190 + \frac{0,964}{\left[1 + (1,945 \cdot \text{Suction})^{3,985} \right]^{0,749}} \right\} \cdot 100\%$$

όπου: θ η υγρασία (v/v %) και Suction η μύζηση σε cm στήλης νερού

Σύμφωνα με τους Bougoul κ.α. (2005), οι εξισώσεις για τις Χ.Κ.Υ. που αφορούν την ύγρανση είναι λιγότερο αξιόπιστες από αυτές της κατανάλωσης κυρίως επειδή κατά τη διάρκεια της ύγρανσης οι δυνάμεις βαρύτητας και οι τριχοειδείς δυνάμεις επιδρούν αθροιστικά.



Εικόνα 65 Χ.Κ.Υ. για περλίτη και πετροβάμβακα (σύνθεση από Milks κ.α., 1989, Bougoul κ.α., 2005, Al Naddaaf κ.α., 2011). Η γαλάζια περιοχή αντιπροσωπεύει το εύρος του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού (ΕΔΝ – EAW).

Με ολοκλήρωση των καμπυλών (Εικόνα 65) των Milks κ.α. (1989α, β και γ) από 0 έως ύψος υποστρώματος και στη συνέχεια με διαίρεση με αυτό (Savvas, 2009), υπολογίστηκε η υδατοικανότητα φυτοδοχείου για τα δύο υποστρώματα: 38,69% για τον περλίτη (0-16cm)³⁴ και 78,54% για τον πετροβάμβακα (0-7,5cm). Με ολοκλήρωση των καμπυλών (Εικόνα 65) των Al Naddaaf κ.α. (2011) για τον ελληνικό περλίτη και Bougoul κ.α. (2005) για το Grodan Expert, από 0 έως ύψος υποστρώματος και στη συνέχεια με διαίρεση με αυτό (Savvas, 2009), υπολογίστηκε η υδατοικανότητα φυτοδοχείου για τα δύο υποστρώματα: 42,11% για τον περλίτη (0-16cm)³⁵ και 61,39% για τον πετροβάμβακα (0-7,5cm).

Είναι προφανές (Εικόνα 65) ότι υπάρχουν διαφορές στις Χ.Κ.Υ. ακόμη και μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών του ίδιου τύπου υποστρώματος. Ακόμη πρέπει να τονιστεί ότι πολλά υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στην πράξη έχουν ειδική διαστρωμάτωση ώστε να συγκρατούν περίπου την ίδια ποσότητα νερού καθόλο το προφίλ του ύψους τους (Εικόνα 25).

Πρόγραμμα άρδευσης

Εφαρμόστηκαν δύο προσεγγίσεις όσο αφορά το πρόγραμμα άρδευσης: χρονικός προγραμματισμός και αυτόματη διαχείριση με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία.

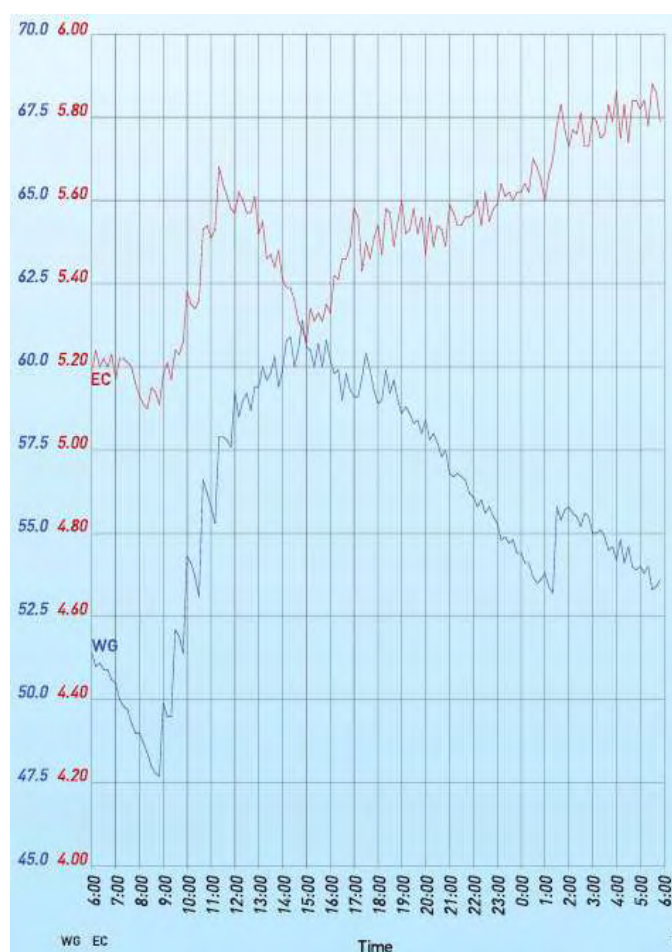
Ο Willits (2003), έχοντας ως υπόβαθρο εργασίες προσαρμογής του μοντέλου Penman-Monteith στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (Stanghellini, 1987; Baille κ.α., 1994; Seginer κ.α., 2000) αξιολόγησε την εφαρμογή του σε καλλιέργεια τομάτας με πυκνότητα φύτευσης 2,5 φυτά m⁻² (επί 3 έτη) και κατέληξε ότι το μοντέλο λειτουργεί ικανοποιητικά όταν το έλλειμμα πίεσης κορεσμού εισάγεται ως συνάρτηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και η αντίσταση της κόμης στη διάχυση υδρατμών θεωρηθεί σταθερή. Το μοντέλο του έχει ένα μέσο σφάλμα της τάξης του 3,64%. Οι Lizarraga κ.α. (2003) αξιολόγησαν χρονικό προγραμματισμό σε σχέση με έλεγχο με βάση ολοκλήρωση ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας για την περίοδο άνοιξη - καλοκαίρι - φθινόπωρο για υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (σε περιοχή με Μεσογειακό κλίμα, σε περλίτη, με πυκνότητα φύτευσης 1,6 φυτά m⁻²). Κατέληξαν ότι η άρδευση όταν

³⁴ Στον περλίτη υπάρχει ένα ζήτημα σχετικά με το σχήμα του σάκου που παρουσιάζει μία εξόγκωση προς τη μέση του ύψους. Στο πλαίσιο των συγκεκριμένων υπολογισμών η διαφοροποίηση αυτή θεωρήθηκε αμελητέα.

³⁵ Στον περλίτη υπάρχει ένα ζήτημα σχετικά με το σχήμα του σάκου που παρουσιάζει μία εξόγκωση προς τη μέση του ύψους. Στο πλαίσιο των συγκεκριμένων υπολογισμών η διαφοροποίηση αυτή θεωρήθηκε αμελητέα.

συγκεντρώνονται 810 kJ m^{-2} (225 Wh m^{-2}) ενέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συντελεί στην καλύτερη αξιοποίηση του νερού από τα φυτά. Παρόμοιες συστάσεις γίνονται και από τον Lee (2010) όσο αφορά τη συχνότητα για την ίδια εποχή (καλλιέργεια τομάτας με πυκνότητα $2,2 \text{ φυτά m}^{-2}$ σε υπόστρωμα πετροβάμβακα Grodan και σε κλίμα κεντρικής Ευρώπης), ο οποίος προτείνει άρδευση ανά $700\text{-}850 \text{ kJ m}^{-2}$ ($195\text{-}235 \text{ Wh m}^{-2}$) στο εξωτερικό του θερμοκηπίου.

Όσο αφορά τη δόση άρδευσης οι Lizarraga κ.α. (2003) αναφέρουν απλά ότι χρησιμοποίησαν τη προσέγγιση Penman-Monteith για τον υπολογισμό της χωρίς να δίνουν συγκεκριμένες τιμές. Ο Lee (2010) προτείνει ως γενικό κανόνα τα $2 \text{ έως } 4 \times 10^{-4} \text{ ml/J}$. Όσο αφορά την απορροή αναφέρονται διάφορες τιμές για ανοικτά υδροπονικά συστήματα από $10 \text{ έως και } 45\%$ (Lizarraga κ.α., 2003; Lee, 2010).



Εικόνα 66 Δεδομένα από νυχτερινή άρδευση σε καλλιέργεια τομάτας σε Grodan (4/2003). Νωρίς το απόγευμα υπάρχει ανεπιθύμητη μείωση των επιπέδων WC και παράλληλη αύξηση της EC (πιθανότατα λόγω μεγάλου ποσοστού απορροής ανά κύκλο). Εάν δεν λυθεί το πρόβλημα πιθανότατα θα προκύψουν ποιοτικά προβλήματα στην παραγωγή λόγω υψηλής EC. Η προσπάθεια επίλυσης μέσω νυχτερινής άρδευσης αποτυγχάνει καθώς η EC συνεχίζει να αυξάνει (Lee, 2010)

Ένα ζήτημα που απασχολεί τον προγραμματισμό της άρδευσης είναι το εάν πρέπει να γίνονται αρδεύσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το δεδομένο είναι ότι -αν και όχι σημαντική- υπάρχει κατανάλωση νερού από τα φυτά και τη νύχτα. Οι Lizarraga κ.α. (2003) παρείχαν χρονικά προγραμματισμένες αρδεύσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας με σκοπό την αποφυγή μεγάλης μείωσης στην υγρασία υποστρώματος. Ο Lee (2010) θεωρεί αποδεκτή μία μείωση της υγρασίας υποστρώματος κατά 10% κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ο ίδιος αναφέρει ότι οι αρδεύσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας πρέπει να αποτελούν εξαίρεση και όχι κανόνα και για το λόγο αυτό δεν πρέπει να είναι απλά χρονικά προγραμματισμένες. Νυχτερινές αρδεύσεις πρέπει να δίνονται με αναφορά τη δραστηριότητα της καλλιέργειας που συνήθως σχετίζεται με τη χρήση συστήματος ύγρυνσης για το δροσισμό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας (Εικόνα 66).

Στο πλαίσιο των μετρήσεων εφαρμόστηκε μία σειρά από προγράμματα άρδευσης. Στην αρχή εφαρμόστηκε ένα εμπειρικό χρονικό πρόγραμμα ενώ στην συνέχεια τόσο το χρονικό όσο και το πρόγραμμα με συγκέντρωση ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία βασίστηκαν σε υπολογισμούς στο πλαίσιο της προσέγγισης που έχει ήδη παρουσιαστεί στο κεφάλαιο για τα υλικά, μέθοδοι και τεχνικές (Katsoulas κ.α., 2006). Οι στόχοι που τέθηκαν ήταν οι ακόλουθοι:

- Πρέπει πρώτα να υπάρχει εξατμισοδιαπνοή από την καλλιέργεια και στην συνέχεια να αναπληρώνεται η αντίστοιχη ποσότητα νερού μέσω άρδευσης.
- Η συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας για την σηματοδότηση έναρξης άρδευσης έπρεπε να είναι στα επίπεδα που συστήνονται στη βιβλιογραφία (λαμβάνομένου υπόψη του τόπου, της εποχής και της θέσης μέτρησης της ακτινοβολίας).
- Η υγρασία θα έπρεπε να διατηρηθεί εντός του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού (τυπικά 46% από τα επίπεδα της υδατοικανότητας για τον πετροβάμβακα και 7% για τον περλίτη) και όσο το δυνατόν εγγύτερα στην Υδατοικανότητα Φυτοδοχείου (υπολογίστηκε ίση με 42,11% για τον περλίτη (0-16cm) και 61,39% για τον πετροβάμβακα (0-7,5cm) που χρησιμοποιήθηκαν).
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα θα έπρεπε να διατηρηθεί στα επίπεδα κοντά στα 2-3 dS m⁻¹ (Li κ.α., 2001; Lizarraga κ.α., 2003; Lee, 2010)³⁶.
- Η πτώση της υγρασίας στο υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της νύχτας να μην είναι μεγαλύτερη από 10% (Stradiot, 2001; Lee, 2010)³⁷

³⁶ Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τον Stradiot (2001), άρδευση τομάτας με όγκο από τα επίπεδα των 150ml και πάνω, ανά φυτό και άρδευση συντείνει στο να διατηρείται η EC σε υπόστρωμα πετροβάμβακα (Grodan) σταθερότερη.

- Ο στόχος απορροής ήταν σε όλες τις περιπτώσεις 30% (Lizarraga κ.α., 2003; Lee, 2010).

Τα προγράμματα που εφαρμόστηκαν ήταν τα ακόλουθα:

Χρονικός προγραμματισμός:

Από 10/2/2011 έως 28/3/2011 το εμπειρικό πρόγραμμα άρδευσης που εφαρμόζονταν ήταν χρονικό (6 αρδεύσεις ανά ημέρα):

- Συχνότητα άρδευσης (Ώρες άρδευσης): 8:30, 10:30, 12:15, 13:45, 15:30, 17:30
 - Διάρκεια άρδευσης 2min για τον πετροβάμβακα και 2min 45sec για τον περλίτη
- Μετά από ανάλυση των δεδομένων υγρασίας υποστρώματος κατά το πρώτο διάστημα, από 29/3/2011 έως 9/4/2011 και τον υπολογισμό συχνότητας και δόσης, συνεχίστηκε ο χρονικός προγραμματισμός αλλά με νέο πρόγραμμα (10 αρδεύσεις ανά ημέρα):
- Συχνότητα άρδευσης (Ώρες άρδευσης): 8:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 15:00, 16:00, 17:00, και 18:45
 - Διάρκεια άρδευσης 3min για τον πετροβάμβακα και 3min 45sec για τον περλίτη

Άρδευση με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία:

Από τις 10/4/2011 έως 10/5/2011 εφαρμόστηκε πρόγραμμα άρδευσης με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά δεδομένα που αναφέρθηκαν και την περατότητα του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου αποφασίστηκε η άρδευση να γίνεται ανά 1080 kJ m^{-2} (280 Wh m^{-2}) και 1260 kJ m^{-2} (350 Wh m^{-2}) ενέργειας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου στον πετροβάμβακα και στον περλίτη αντίστοιχα³⁸. Η δόση άρδευσης που αντιστοιχεί σε

³⁷ Σύμφωνα με τον Stradiot (2001), σε Grodan, μια διαφορά μικρότερη από 8% βοηθά τη βλαστική δραστηριότητα στην τομάτα ενώ μια διαφορά πάνω από 10% βοηθά στην παραγωγική δραστηριότητα.

³⁸ Η αρχική σκέψη για καθορισμό της συχνότητας με βάση ένα όριο αύξησης της μύζησης υποστρώματος (στην βιβλιογραφία (Lieth και Oki, 2007) αναφέρονται όρια 1 και 5kPa) δεν μπορούσε να εφαρμοστεί στα συγκεκριμένα υποστρώματα λόγω του ότι ακόμη και μικρή μεταβολή της μύζησης (π.χ. από υδατοικανότητα (1kPa) στα 1,5 ή 2kPa) αντιστοιχούσε (ιδιαίτερα στον πετροβάμβακα σε ιδιαίτερα υψηλή μεταβολή της κατ'όγκο υγρασίας (έως και 25%). Οι Schroeder και Lieth (2002) αναφέρουν ότι το όριο των 5kPa πρέπει να κατέβει πολύ στην περίπτωση του πετροβάμβακα. Οι ίδιοι αναφέρουν τιμή στόχο για την υγρασία το 60% για την περίπτωση καλλιέργειας αγγουριού σε πετροβάμβακα. Οι Lieth και Oki (2007)

αυτή την ποσότητα ενέργειας σύμφωνα με την προσέγγιση που παρουσιάζεται από τους Katsoulas κ.α., (2006), για $K_c=1,05$, IE (αποτελεσματικότητα άρδευσης) = 95%, $\tau=75\%$ και $\alpha=0,6$, είναι 137,5 και 172 ml/φυτό -για το κάθε υπόστρωμα αντίστοιχα- για κάθε άρδευση (αναμενόμενη μείωση υγρασίας στο υπόστρωμα μεταξύ αρδεύσεων: 3,4% για πετροβάμβακα και 1,3% για περλίτη, αναμενόμενος αριθμός ημερήσιων αρδεύσεων 12 και 10 αντίστοιχα). Η διάρκεια άρδευσης (ώστε να δοθεί η αντίστοιχη δόση) υπολογίστηκε στα 4min και 10sec και 5min και 10sec για το κάθε υπόστρωμα αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στις 8:00 κάθε πρωί γινόταν μία χρονικά προγραμματισμένη άρδευση (με διάρκεια 5min) και μηδενισμός του ολοκληρωτή ενέργειας, ενώ η ολοκλήρωση γινόταν έως τις 19:00 το απόγευμα.

Αισθητήρες

Στο πλαίσιο των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι αισθητήρες διηλεκτρικής χωρητικότητας για τη μέτρηση της υγρασίας υποστρώματος:

- Delta T, ThetaProbe (Εικόνα 67)
- Decagon Devices, EC5 (Εικόνα 68),
- Decagon Devices, 10HS (Εικόνα 68) και
- Grodan WCM-Control (Εικόνα 69)

Ο αισθητήρας WCM-Control της Grodan μετρά επιπλέον την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) και τη θερμοκρασία υποστρώματος και έχει εργοστασιακές επιλογές για κατευθείαν χρήση στους διάφορους τύπος υποστρωμάτων της Grodan.

αναφέρουν και αυτοί ότι οι ενδείξεις είναι ενάντια στη χρήση τενσιομέτρων για ρύθμιση της άρδευσης σε υποστρώματα όπως ο πετροβάμβακας και ο περλίτης).



Εικόνα 67 ML2 ThetaProbe (ΔΤ, 2010)

Αναλυτικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και τη βαθμονόμηση των αισθητήρων για τα υποστρώματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στα ειδικά τμήματα του κεφαλαίου. Σε κάθε περίπτωση η βαθμονόμηση των αισθητήρων αυτών (πλην του WCM-Control της Grodan για πετροβάμβακα – ο οποίος έχει εργοστασιακή βαθμονόμηση για όλους τους τύπους πετροβάμβακα της εταιρείας) είναι απαραίτητη ώστε να λαμβάνονται όσο το δυνατόν ακριβέστερες μετρήσεις (Nemali κ.α., 2007; Miralles, κ.α., 2010).



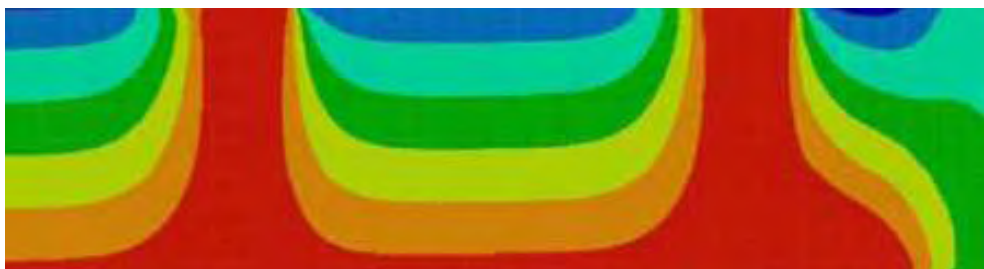
Εικόνα 68 Ο Em50 Data Logger και οι αισθητήρες EC5 και 10HS (Decagon, 2010)



Εικόνα 69 To Water Content Meter (WCM-Control) της Grodan

Αξιολόγηση επιλογών (ως προς θέση στο υπόστρωμα και χρόνο μέτρησης) σχετικά με την τοποθέτηση αισθητήρων

Όσο αφορά την αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων, η χρήση ενός μόνο αισθητήρα για κάθε ζώνη / στάση άρδευσης πιθανότητα δεν είναι αποτελεσματική (Pardossi κ.α., 2009, Δρίμτσιας, 2011). Γενικά στα υποστρώματα επικρατεί ανομοιομορφία όσο αφορά την υγρασία (αλλά και άλλες παραμέτρους όπως η EC) τόσο σε χρονικό όσο και σε τοπικό επίπεδο (Εικόνα 70, Bougoul και Boulard, 2006).



Εικόνα 70 Μεταβολές υγρασίας σε υπόστρωμα Grodan Expert μετά από άρδευση (Bougoul και Boulard, 2006).

Όταν μετράται η υγρασία σε ένα υπόστρωμα μία σειρά από παράγοντες επηρεάζουν τις μετρήσεις:

- τα δομικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος,
- το φυτοδοχείο και τα χαρακτηριστικά τοποθέτησης (π.χ. ύψος και διατομή δοχείου, αρχική προετοιμασία υποστρώματος (αρχικός κορεσμός με νερό, ύψος και ομοιομορφία τομών απορροής σε σάκους υποστρώματος), μέγεθος της κατά μήκος κλίσης για την επίτευξη απορροής κοκ),
- η ζήτηση νερού από τα φυτά (εξαρτάται από διαφοροποιήσεις στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, στην πυκνότητα φύτευσης κοκ),
- το μοτίβο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των φυτών,
- τα χαρακτηριστικά του αρδευτικού συστήματος (αριθμός και παροχή σταλακτών, ομοιομορφία αρδευτικού κοκ),
- το πρόγραμμα άρδευσης (συχνότητα – δόση),
- η ακρίβεια των αισθητήρων και η συνάφεια υποστρώματος – αισθητήρων,
- η θέση μέτρησης, απόσταση από εξόδους (π.χ. σταλάκτες) του αρδευτικού,
- η χρονική στιγμή της μέτρησης σε σχέση με τα αρδευτικά γεγονότα.

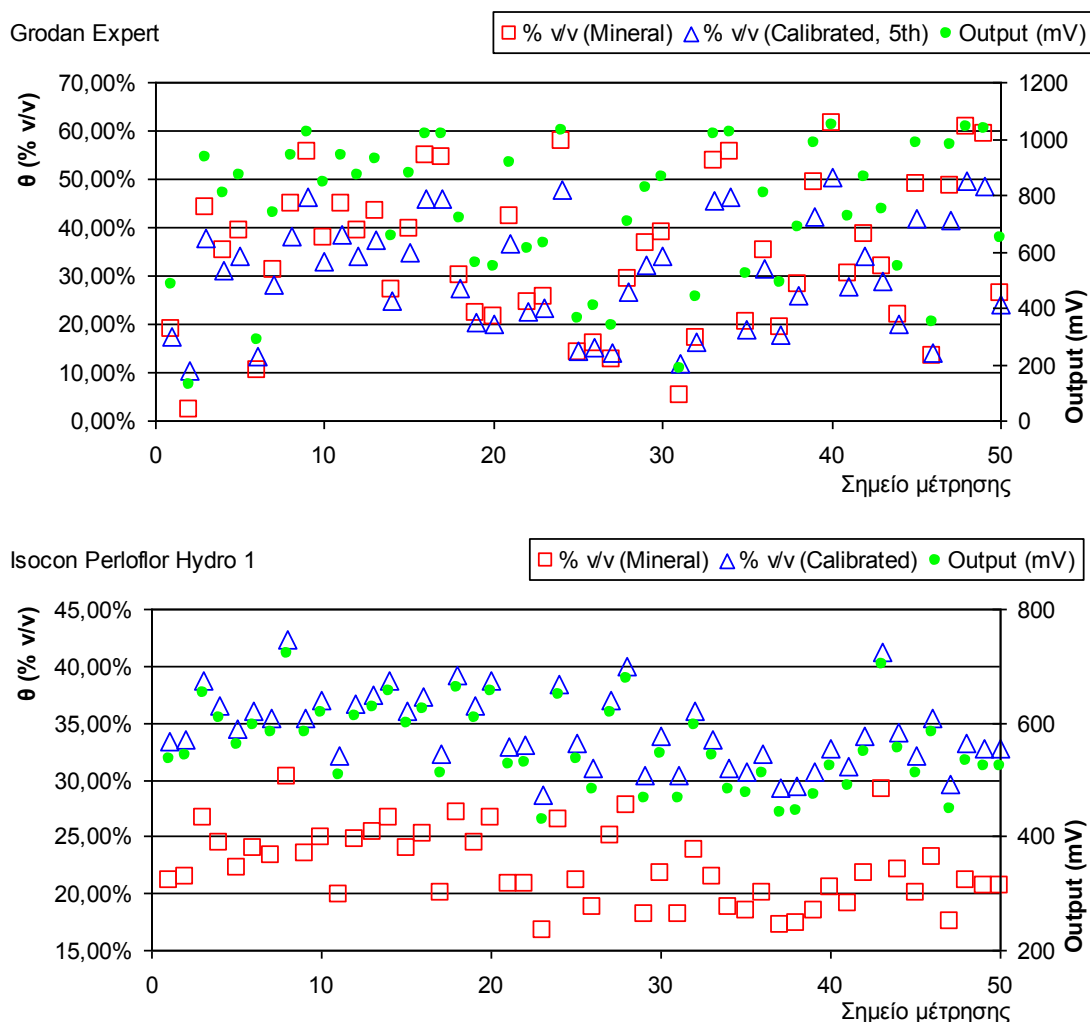
Όσο αφορά την τοποθέτηση των αισθητήρων μέσα στο υπόστρωμα, στο έδαφος η γενική σύσταση είναι να τοποθετούνται οι αισθητήρες σε ζεύγη, ένα στο 1/3 και ένας ακόμη στα 2/3 του βάθους ριζοστρώματος (Pardossi κ.α., 2009). Στα φυτοδοχεία το ριζικό σύστημα έχει τη διάθεση να αναπτύσσεται κυρίως στο κάτω μισό του δοχείου και μόνο λίγες ρίζες υπάρχουν στο κοντά στην επιφάνεια του υποστρώματος (Bilderback και Fonteno, 1987; Pardossi κ.α., 2009). Παράλληλα, σε φυτοδοχεία μικρού όγκου και/ή σε συστήματα υδροπονίας, η συχνότητα άρδευσης είναι συνήθως πολύ υψηλή και μεταξύ των αρδεύσεων παρουσιάζονται πολύ μικρές διακυμάνσεις της μέσης τάσης πλέγματος (μύζησης) που ουσιαστικά μένει γύρω από αυτή που αντιστοιχεί στην υδατοικανότητα φυτοδοχείου (ισορροπία μετά από άρδευση με επαρκή ποσότητα νερού και ελεύθερη στράγγιση). Σε κατάσταση υδατοικανότητας φυτοδοχείου το περιεχόμενο σε νερό στο κάτω μέρος του φυτοδοχείου βρίσκεται στα επίπεδα του κορεσμού (και οι τάσεις έχουν μηδαμινή διακύμανση) και σταδιακά μειώνεται προς την κορυφή του φυτοδοχείου (Raviv κ.α., 2002; Gizas και Savvas, 2007). Για το λόγο αυτό οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετούνται σε μία ενδιάμεση θέση ως προς το ύψος ή να λαμβάνουν μέτρηση από όλο το ύψος του

υποστρώματος. Οι Bacci κ.α. (2003) κατέγραψαν μετρήσεις από 12 ίδια τενσιόμετρα, τοποθετημένα σε ξεχωριστές γλάστρες που βρίσκονταν σε απόσταση 0,5m μεταξύ τους σε θερμοκήπιο. Η διακυμάνσεις που υπολογίστηκαν ήταν της τάξης του 17% όσο αφορά την περιεκτικότητα σε νερό και 21% για την μύζηση. Ακόμη οι ίδιοι ερευνητές (Bacci κ.α., 2003) κατέληξαν ότι η καλύτερη κατακόρυφη θέση μέτρησης για φυτά που καλλιεργήθηκαν σε φυτοδοχεία όγκου από 1,5 έως 9,0 L είναι στο 1/3 του ύψους από την επιφάνεια και 3-4 cm από την άκρη του δοχείου. Ακόμη βρήκαν ότι ο αισθητήρας πρέπει να τοποθετείται σε γωνία 90° ως προς τους σταλάκτες. Σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης του WCM-Control της Grodan (Lee, 2010; Grodan, 2011), το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για υποβοήθηση αποφάσεων σχετικά με άρδευση υδροπονικών καλλιεργειών, οι ακίδες του αισθητήρα πρέπει να τοποθετούνται 10-15cm από τον κύβο αναπαραγωγής κατά τη διεύθυνση κίνησης του νερού. Οι ακίδες έχουν μήκος 7cm, έτσι όσο αφορά τα υποστρώματα της εταιρείας με πάχος 7,5cm συστήνεται ο αισθητήρας να τοποθετείται κατακόρυφα από το πάνω μέρος του σάκου υποστρώματος -ώστε να διαβάζει το μέσο όρο της υγρασίας από όλο το κατακόρυφο προφίλ- και κάθετα στο μεγάλο άξονα του σάκου. Για τύπους με ύψος 10cm και πάνω η πρόταση είναι να τοποθετείται ο αισθητήρας από το πλάι. Τέλος η σύσταση όσο αφορά την αξιοποίηση των μετρήσεων είναι να χρησιμοποιούνται μόνο όσες μετρήσεις αξιολογούνται ως αντιπροσωπευτικές από χαρακτηριστικά σημεία της καλλιέργειας, και πάντα να λαμβάνεται υπόψη ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση από σειρά μετρήσεων πριν ληφθεί οποιαδήποτε απόφαση. Στις οδηγίες χρήσεις και σε σχετικά τεχνικά κείμενα (Lee, 2010; Grodan, 2011) δεν δύνεται κάποια οδηγία σχετικά με το χρόνο που πρέπει να γίνουν οι μετρήσεις σε σχέση με τα αρδευτικά γεγονότα. Σε πρακτικό επίπεδο προτείνεται οι μετρήσεις να γίνονται το πρωί πριν από την πρώτη άρδευση (Δρίμτσιας, 2011).

Αξιολόγηση ομοιομορφίας μετρήσεων υγρασίας υποστρώματος

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η ομοιομορφία του συστήματος άρδευσης έχει εκτιμηθεί ως άριστη, η χωρική μεταβλητότητα του μικροκλίματος είναι γενικά μικρή (τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται), η προετοιμασία του υποστρώματος έγινε σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες (άρδευση στον κορεσμό και μετά από 48h τομές ανά διαστήματα στο χαμηλότερο μέρος του σάκου, (Δρίμτσιας, 2011)), η ανάπτυξη των φυτών ήταν ομοιόμορφη, οι μετρήσεις έγιναν σε σάκους με 3 φυτά, σε σημείο μεταξύ των φυτών κατά τη διεύθυνση ροής του νερού και τέλος όσο αφορά το χρόνο των μετρήσεων έχουν γίνει (εκτός από ορισμένες ειδικές περιπτώσεις που αναφέρονται) σε χρόνο μεταξύ αρδευτικών γεγονότων.

Μετρήσεις που έγιναν στις 17/2/2011 με ML2 ThetaProbe σε 50 τυχαίους σάκους σε κάθε υπόστρωμα (73,5% του πληθυσμού) με κοινό χαρακτηριστικό το ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο αισθητήρας τοποθετήθηκε κατακόρυφα από το πάνω μέρος του σάκου έδειξαν (Εικόνα 71) ότι οι μεταβολές στις μετρήσεις ήταν ιδιαίτερα έντονες στον πετροβάμβακα και λιγότερο έντονες στον περλίτη άσχετα εάν χρησιμοποιούνταν η γενική συνάρτηση μετατροπής του σήματος σε υγρασία (mineral edáphi) ή η εξίσωση που είχε προκύψει μετά από βαθμονόμηση του αισθητήρα για το κάθε υπόστρωμα. Για τον πετροβάμβακα με βάση τη βαθμονόμηση, η μέση τιμή της υγρασίας ήταν 32,46% με τυπική απόκλιση 11,84%, μέγιστη τιμή 50,27% και ελάχιστη τιμή 6,65%. Για τον περλίτη οι αντίστοιχες τιμές ήταν 34,37%, 3,29%, 42,32% και 28,73%.



Εικόνα 71 Μεταβλητότητα μετρήσεων υγρασίας με ML2 ThetaProbe σε πετροβάμβακα και περλίτη (17/2/2011)

Μετρήσεις ομοιομορφίας τόσο όσο αφορά τη θέση εντός του θερμοκηπίου, όσο και το χρόνο σχετικά με άρδευση έγιναν και με το WCM-Control της Grodan (ρυθμισμένο για πετροβάμβακα Grodan Expert και βαθμονομημένο για τον περλίτη). Οι μετρήσεις έγιναν από 10 έως 18/4/2011 και αφορούσαν δείγμα 30% των σάκων υποστρώματος³⁹. Όσο αφορά την τοποθέτηση του οργάνου ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του κατασκευαστή (Grodan, 2011) (για τον περλίτη τοποθετήθηκε στο πλάι, στη μέση του ύψους), ενώ όλες οι μετρήσεις έγιναν σε σάκους με 3 φυτά. Έγιναν 3 σετ μετρήσεων, τα οποία επαναλήφθηκαν 3 διαφορετικές ημέρες (δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μέσες τιμές, t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95%):

- Το πρώτο σετ μετρήσεων έγινε στις 6:30π.μ. (τοπική ώρα) πριν αρχίσει ουσιαστικά η διαπνοή των φυτών,
- το δεύτερο σετ στις 9:00π.μ. (τοπική ώρα) μετά από συνεχείς αρδεύσεις με σκοπό την αύξηση της υγρασίας στο υπόστρωμα κατά 20%
- το τρίτο σετ, στις 11:45π.μ. (τοπική ώρα – ηλιακό μεσημέρι 11:35) στο μεσοδιάστημα δύο αρδεύσεων

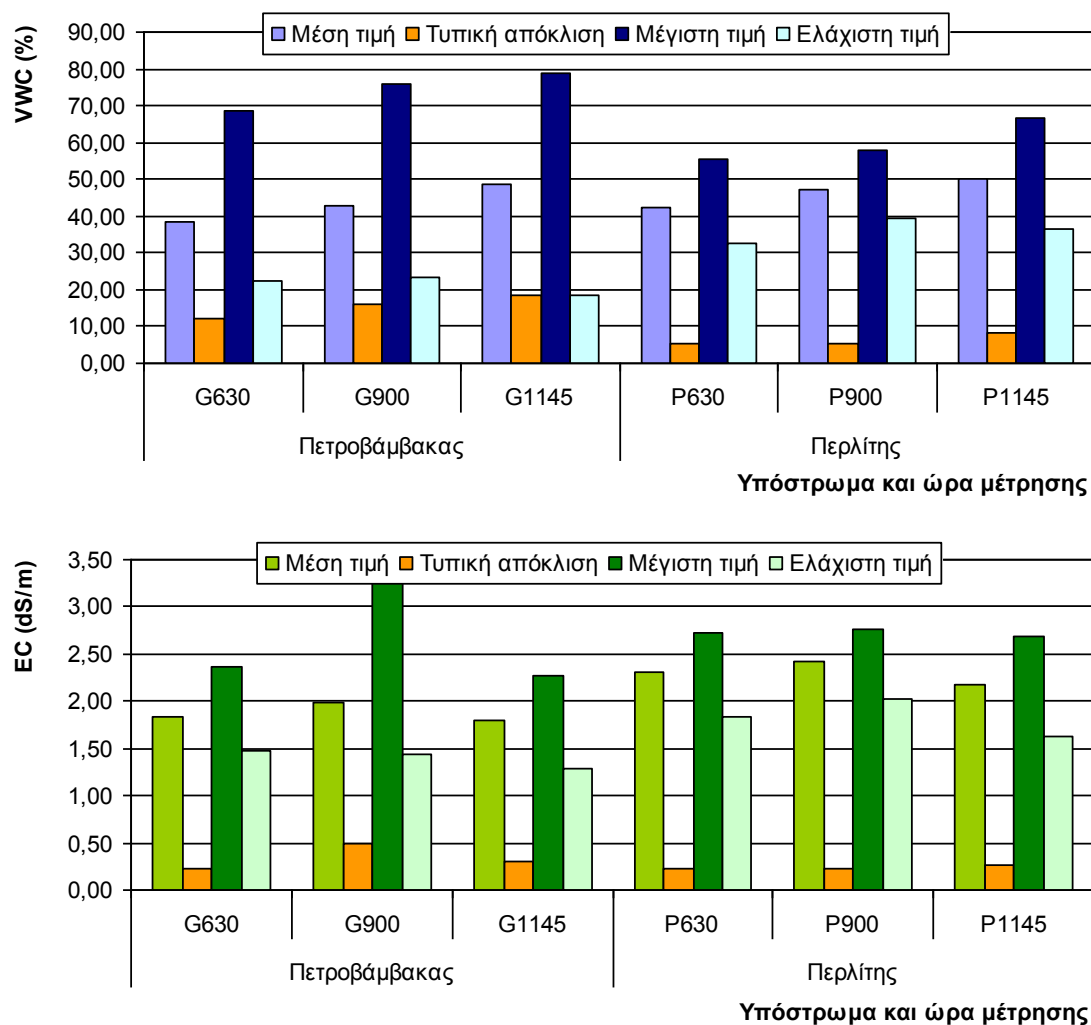
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνοψίζονται στην Εικόνα 72 (σημειώνεται ότι στον πετροβάμβακα οι μετρήσεις που ήταν <20% και >80% δεν ελήφθησαν υπόψη (Δρίμτσιας, 2011)). Είναι φανερό ότι ανεξάρτητα του χρόνου μέτρησης σε σχέση με τα αρδευτικά γεγονότα, παραμένει το πρόβλημα της υψηλής απόκλισης (μέση τιμή 38,67 έως 48,58 και αντίστοιχη τυπική απόκλιση 12,30 και 18,38%). Τόσο η μέση τιμή, όσο και η τυπική απόκλιση παρουσιάζονται αυξημένες όταν οι μετρήσεις γίνονται ανάμεσα σε δύο τυπικά αρδευτικά γεγονότα (αναμένονταν το αντίθετο). Σημειώνεται ότι το 25% των μετρήσεων ήταν εκτός ορίων (20% και 80%) και έτσι δεν συμπεριλήφθηκαν στη στατιστική επεξεργασία. Όσο αφορά την EC, οι μέσες τιμές κυμάνθηκαν από 1,79 έως 1,99 dS/m και η τυπική απόκλιση από 0,22 έως 0,49 αντίστοιχα.

Στον περλίτη η απόκλιση παραμένει χαμηλή (μέση τιμή 41,76 έως 49,74 και αντίστοιχη απόκλιση 3,60 έως 6,47%) ενώ και εδώ αυξάνεται όταν οι μετρήσεις γίνονται μεταξύ δύο τυπικών αρδεύσεων (11:45).

Δοκιμές με τοποθέτηση του αισθητήρα από το πλάι (στη μέση του ύψους) στον πετροβάμβακα (όπως γινόταν στον περλίτη) δεν βελτίωσε, αλλά αντίθετα έκανε πολύ χειρότερη- την κατάσταση όσο αφορά τις αποκλίσεις. Πολλές μετρήσεις ήταν

³⁹ Σύμφωνα με τον κατασκευαστή (Δρίμτσιας, 2011) μέτρηση σε 15 σάκους / στρέμμα είναι αρκετή.

μηδενικές και η τυπική απόκλιση –ακόμη και εάν εξαιρούνταν οι μηδενικές μετρήσεις- ήταν του επιπέδου του 30%.



Εικόνα 72 Διαφοροποίηση τιμών μετρήσεων υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος (μέτρηση με Grodan WCM)

Παρόμοιες μετρήσεις έγιναν και με τον αισθητήρα 10HS της Decagon (4 βαθμονομημένοι αισθητήρες συνεχούς μέτρησης, μόνιμα εγκατεστημένοι κατακόρυφα σε διάφορα σημεία σε κάθε υπόστρωμα από 22/2 έως 15/4/2011) για χρόνο ανάμεσα σε αρδευτικά γεγονότα (Πίνακας 8).

Πίνακας 8 Μέσες τιμές και αποκλείσεις για μετρήσεις υγρασίας με Decagon 10HS

	Grodan Expert		ISOCON Perloflor Hydro 1	
	Μέση τιμή	Τυπ. Αποκλ.	Μέση τιμή	Τυπ. Αποκλ.
Κατακόρυφη τοποθέτηση από επάνω (πρώτη περίοδος χρονικού προγραμματισμού)	34,22%	2,57%	19,39%	0,66%

	Grodan Expert		ISOCON Perloflor Hydro 1	
	Μέση τιμή	Τυπ. Αποκλ.	Μέση τιμή	Τυπ. Αποκλ.
Οριζόντια τοποθέτηση στο μέσο (πρώτη περίοδος χρονικού προγραμματισμού)	58,01%	4,01%	23,04%	1,95%
Οριζόντια τοποθέτηση στο μέσο (δεύτερη περίοδος χρονικού προγραμματισμού)	54,60%	7,01%	21,90%	2,01%
Οριζόντια τοποθέτηση στο μέσο (προγραμματισμός με συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας)	54,21%	5,14%	23,20%	0,65%

Είναι φανερό ότι η επίδραση του μεγάλου όγκου μέτρησης του 10HS είναι σημαντική μια και η βελτίωση είναι σοβαρή. Όμως η αξία των μετρήσεων σε αυτό ειδικά το υπόστρωμα ελέγχεται (βλέπε συνέχεια).

Μετρήσεις ομοιομορφίας έγιναν και με τον EC5 της Decagon σε 6 τυχαία σημεία του κάθε υποστρώματος υποστρώματος, σε χρόνο μεταξύ αρδεύσεων (κοντά στο ηλιακό μεσημέρι), με τον αισθητήρα τοποθετημένο από επάνω. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν σε 3 διαφορετικές ημέρες και δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μέσες τιμές (t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95%). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην συνέχεια (Πίνακας 9) και δείχνουν ότι και με τον αισθητήρα αυτό, στον πετροβάμβακα παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των διαφόρων θέσεων εντός του θερμοκηπίου.

Πίνακας 9 Μέσες τιμές και αποκλίσεις για μετρήσεις υγρασίας με Decagon EC5

	Grodan Expert	ISOCON Perloflor Hydro 1
Μέση τιμή	52,11%	33,21%
Τυπική απόκλιση	19,05%	1,05%
Μέγιστη τιμή	71,65%	33,15%
Ελάχιστη τιμή	29,23%	32,10%

Σε όλους τους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, μέρος της διαφοροποίησης των μετρήσεων μπορεί καταρχήν να αποδοθεί στη δυνατότητα εύρους και στην ακρίβεια που έχουν:

- DT ThetaProbe (εύρος: πλήρες εύρος 0-100%, η ακρίβεια που δίνεται όμως ισχύει από 5 έως 60%) $\pm 5\%$ χωρίς βαθμονόμηση για το συγκεκριμένο υπόστρωμα και έως $\pm 1\%$ (0-40°C) αφού γίνει βαθμονόμηση).
- Decagon EC5 (εύρος 0-100%) και 10HS (εύρος 0-57%), $\pm 3\%$ χωρίς βαθμονόμηση για το συγκεκριμένο υπόστρωμα και για ηλεκτρική αγωγιμότητα $< 10 \text{ dS/m}$ και $\pm 1\text{-}2\%$ αφού γίνει βαθμονόμηση (για οποιαδήποτε τιμή της EC)
- Grodan WCM-Control (εύρος 0-100%), $\pm 2.5\%$ έως $\pm 5.0\%$ για την υγρασία, 0,1-0,5 dS m^{-1} για την EC

Και για τα δύο υποστρώματα υπάρχει πρόβλημα όσο αφορά τις μετρήσεις και σε αυτό το πιθανότερο είναι ότι συντελεί η έντονη ανομοιομορφία όσο αφορά την υγρασία στο εσωτερικό των υποστρωμάτων.

Στο περλίτη η τυπική απόκλιση των μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ 3 και 7% επομένως το 95% των μετρήσεων αναμένεται να είναι στο διάστημα μέση τιμή $\pm 6\text{-}14\%$. Λαμβανομένου υπόψη όμως ότι το εύρος του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού στον περλίτη αναμένεται να είναι περίπου 7%, η δυνατότητα χρησιμοποίησης των αισθητήρων αυτών για ρύθμιση της άρδευσης είναι αναξιόπιστη.

Παρόμοια πράγματα συμβαίνουν στον πετροβάμβακα όπου η τυπική απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 12 και 20% και το εύρος του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού αναμένεται να είναι περίπου 46%.

Θεαματικά καλύτερα αποτελέσματα υπήρχαν στις μετρήσεις με το 10HS. Σε αυτό σίγουρα έπαιξαν ρόλο ο μεγαλύτερος όγκος επίδρασης του αισθητήρα (της τάξης των 1300 cm^3) αλλά από την άλλη αυτό μπορεί να επέδρασε και αρνητικά μια και υπήρχε η πιθανότητα να επηρεάζονταν και από περιοχές εκτός του υποστρώματος (στο κάτω μέρος του καναλιού), γεμάτες με διάλυμα απορροής⁴⁰.

Είναι φανερό ότι οι διαφοροποιήσεις υγρασίας για τον πετροβάμβακα είναι πολύ υψηλές ανεξάρτητα τρόπου τοποθέτησης και χρόνου λήψης των μετρήσεων. Η μεγάλη απόκλιση στις μετρήσεις υγρασίας στον πετροβάμβακα μπορεί να εξηγείται με βάση τα ακόλουθα:

- ο μικρός όγκος της περιοχής δείγματος του ThetaProbe (περίπου 75 cm^3) και ο λίγο μεγαλύτερος του EC5 είναι (181 cm^3) και του WCM-Control ($262,5 \text{ cm}^3$) επηρεάζεται περισσότερο από τις συνθήκες που επικρατούν πολύ κοντά στο σημείο εγκατάστασης σε συνδυασμό με την έντονη ανομοιομορφία που έτσι και αλλιώς παρατηρείται στο υπόστρωμα μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες διαφοροποιήσεις στα επίπεδα άρδευσης,

⁴⁰ Ο κατασκευαστής δεν συστήνει τον 10HS για μετρήσεις σε υποστρώματα υδροπονίας, λόγω του μικρού όγκου που έχουν αυτά.

- η χρονική στιγμή των μετρήσεων καθώς σε συνθήκες μετά από άρδευση μετρούνται μεγαλύτερες ακραίες τιμές,
- ο πετροβάμβακας έχει ύψος 7,5cm και τα EC5 (μήκος ακίδας 5cm), 10HS (μήκος ακίδας 10cm), ThetaProbe (μήκος ακίδας 6cm) και WCM-Control (μήκος ακίδας 7cm), μετρούν πρακτικά μέσο όρο από όλο το διαθέσιμο ύψος όταν τοποθετούνται από πάνω. Όπως φαίνεται από τις Χ.Κ.Υ. για τον πετροβάμβακα μέσα σε λίγα αρχικά cm μύζησης (ή αλλιώς ύψους) έχουμε πολύ μεγάλη διαφορά % v/v υγρασίας (πολύ απότομη κλίση της καμπύλης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα με ελάχιστες διαφορές ύψους (ίσως ακόμη και λίγων mm) να υπάρχουν πολύ μεγάλες διαφορές υγρασίας (%v/v). Επομένως από θέση σε θέση το όργανο μπορεί να μετρά μέσο όρο για βάθη που διαφέρουν από λίγα έως περισσότερα mm και βεβαίως αυτό να αντιστοιχεί σε μεγάλες διαφορές υγρασίας. Στον περλίτη όπου οι μετρήσεις γίνονταν σε συγκεκριμένο ύψος, σε περιοχή όπου οι μεταβολές στην Χ.Κ.Υ. είναι λιγότερο έντονες, δεν υπήρχε τέτοιο πρόβλημα.

Αξιολόγηση δυνατότητας χρήσης αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος στο πλαίσιο της διαχείρισης άρδευσης

Ένα σύστημα ελέγχου άρδευσης όπου η αυτόματη αναπροσαρμογή της συχνότητας άρδευσης γίνεται με βάση την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην καλλιέργεια μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά τις υδατικές ανάγκες των φυτών χωρίς να γίνεται σπατάλη νερού και λιπασμάτων (Stanhill & Scholte, 1974, Abou-Hadid κ.α., 1994, Roh & Lee, 1996, Raviv κ.α., 2002, Lizarrara κ.α., 2003; Katsoulas κ.α., 2006). Η ηλιακή ακτινοβολία συνήθως μετράται με πυρανόμετρα εκτός του θερμοκηπίου⁴¹ και ολοκληρώνεται ως προς το χρόνο. Όταν το ολοκλήρωμα φθάσει σε μία προκαθορισμένη από το χρήστη τιμή, ενεργοποιείται το σύστημα άρδευσης και λειτουργεί όσο χρόνο έχει οριστεί ώστε να δοθεί η προκαθορισμένη δόση νερού στα φυτά. Στη σχετική βιβλιογραφία εντοπίστηκαν αρκετές προσπάθειες για χρήση επιπρόσθετων εισόδων που σχετίζονται με την μέτρηση παραμέτρων υγρασίας στο υπόστρωμα, με σκοπό την βελτίωση της αποτελεσματικότητας συστημάτων ηλιακής ακτινοβολίας. Έχουν αξιολογηθεί συστήματα που σταματούν την άρδευση όταν η απορροή (leaching fraction) φτάσει σε κάποιο προκαθορισμένο ποσοστό της ποσότητας νερού που παρέχεται (Stanghellini και Van Meurs, 1992). Οι Shelford κ.α. (2004) αξιολόγησαν το συνδυασμό συστήματος ολοκλήρωσης ενέργειας από ηλιακή

⁴¹ Ωστε να μην υπάρχουν προβλήματα από περατότητα, σκιάσεις κ.ο.κ.

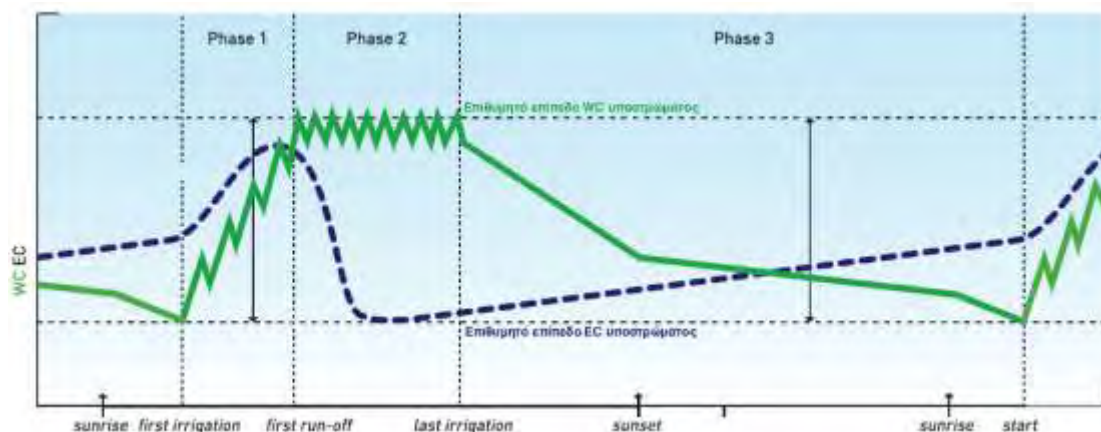
ακτινοβολία με λυσιμετρικό ζυγό σε καλλιέργεια τομάτας. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά μια και τα φυτά λάμβαναν νερό σύμφωνα με τις πραγματικές τους ανάγκες (μπορούσε να γίνει άρδευση ακόμη και τη νύχτα) ενώ η απορροή διατηρούνταν ευκολότερα στα επιθυμητά επίπεδα. Στην αγορά διατίθεται το σύστημα ProDrain (Hortimax, 2010) το οποίο εκτός από το βάρος του υποστρώματος (για υπολογισμό ισοζυγίων νερού) αλλά και το βάρος των φυτών παρέχοντας επιπλέον πληροφορία σχετικά με τις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών.

Τα δεδομένα από αισθητήρες μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για ρύθμιση των παραμέτρων ενός συστήματος ολοκλήρωσης ηλιακής ακτινοβολίας με στόχο τη διατήρηση της υγρασίας και της αγωγιμότητας του υποστρώματος σε συγκεκριμένα επίπεδα ώστε τα φυτά να έχουν τη δυνατότητα να πάρουν το θρεπτικό διάλυμα που χρειάζονται υπό τις καλύτερες δυνατές συνθήκες. Συγκεκριμένα έχουν το δυναμικό να συντελέσουν:

- στον αυτόματο καθορισμό της δόσης άρδευσης,
- στο καθορισμό του χρόνου έναρξης και λήξης των αρδεύσεων στη διάρκεια της ημέρας,
- στην αυτόματη προσαρμογή της συχνότητας άρδευσης,
- στην απόφαση εάν θα γίνουν ή όχι νυχτερινές αρδεύσεις και
- στην παροχή συναγερμών όταν η υγρασία ή η EC ξεπεράσουν κάποια όρια.

Η Grodan B.V. διαθέτει εδώ και κάποια χρόνια στην αγορά σύστημα μετρήσεων (WCM-Continuous και WCM-Control⁴²) για έλεγχο της υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος, και για διαχείριση της άρδευσης σε υδροπονικές καλλιέργειες που χρησιμοποιούν τα υποστρώματά της. Ο αισθητήρας μέτρησης υγρασίας είναι διηλεκτρικής χωρητικότητας. Το σύστημα κατασκευάζεται από την Delta T (ουσιαστικά είναι ο αισθητήρας WET) και είναι βαθμονομημένος για τους διάφορους τύπους υποστρωμάτων της Grodan B.V.. Το ύψος των ακίδων είναι 7cm (επομένως μετρά σχεδόν σε όλο το ύψος για υποστρώματα πάχους 7,5cm). Η τοποθέτησή του γίνεται κατακόρυφα στο πάνω μέρος των σάκων και σε απόσταση 10cm από τα φυτά κατά τη φορά κίνησης του νερού απορροής (στο σχετικό τμήμα του κεφαλαίου αναφέρονται οι συστάσεις του κατασκευαστή για την χρήση του οργάνου).

⁴² Ο αισθητήρας είναι ο ίδιος απλά το πρώτο σύστημα έχει μόνιμη θέση αισθητήρα και συνεχή σύνδεση με τον υπολογιστή ελέγχου της άρδευσης ενώ το δεύτερο σκοπεύει σε μετρήσεις σε διάφορες θέσεις εντός του θερμοκηπίου.



Εικόνα 73 Ημερήσια διακύμανση περιεχομένου σε υγρασία (WC) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) σε υπόστρωμα υδροπονικής καλλιέργειας (Lee, 2010)

Η χρήση του WCM-Continuous δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη χώρα μας, μια και εκφράζονται επιφυλάξεις σχετικά με την αξιοπιστία του αυτό ρυθμιζόμενου συστήματος, αντίθετά η χρήση του WCM-Control συνιστάται για τον έλεγχο της εφαρμογής του προγράμματος άρδευσης και αξιοποιείται ήδη από μεγάλο αριθμό παραγωγών (Δρίμτσιας, 2011).

Στην πρόσφατη εργασία του Lee (2010), παρουσιάζεται μία μεθοδολογία διαχείρισης της άρδευσης για την περίοδο άνοιξης – καλοκαιριού με σκοπό τη διατήρηση των επιπέδων υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο υπόστρωμα υδροπονικών καλλιεργειών στα άριστα για κάθε περίπτωση επίπεδα. Η περίοδος έναρξης και λήξης της άρδευσης σε επίπεδο ημέρας καθώς και η συχνότητα και η δόση των αρδευτικών γεγονότων καθορίζουν τον έλεγχο τόσο της υγρασίας όσο και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο υπόστρωμα, η διακύμανση των οποίων σε ημερήσιο επίπεδο μπορεί να χωρισθεί σε τρεις διακριτές φάσεις (Εικόνα 73):

- Η πρώτη φάση (Phase 1) ξεκινά με την πρώτη άρδευση που συμβαίνει –υπό την λογική του πρώτα διαπνοή ημέρας και μετά άρδευση- κάποια στιγμή (συνήθως 1-2 ώρες) μετά την ανατολή του ήλιου. Ο στόχος κατά τη φάση αυτή είναι να ξεκινήσει την κατάλληλη στιγμή -ανάλογα με την πτώση της υγρασίας κατά τη νύχτα και τη διαφαινόμενη ηλιοφάνεια της ημέρας και κατά συνέπεια τη ζήτηση της καλλιέργειας για νερό- η άρδευση ώστε να φθάσει η υγρασία υποστρώματος στα επιθυμητά επίπεδα και να αρχίσει όταν πρέπει (σε κάποιο επίπεδο έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που εξαρτάται από την εποχή και το στάδιο ανάπτυξης) η απορροή⁴³ με αποτέλεσμα να διατηρηθεί

⁴³ Για παράδειγμα εάν μια φωτεινή ημέρα αργήσει η πρώτη άρδευση τότε η έντονη ζήτηση της καλλιέργειας σε νερό θα καθυστερήσει την πρώτη απορροή και επομένως θα δυσκολευτεί να κατέβει η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αντίστοιχα εάν μία νεφосκεπή ημέρα γίνει πολύ νωρίς η

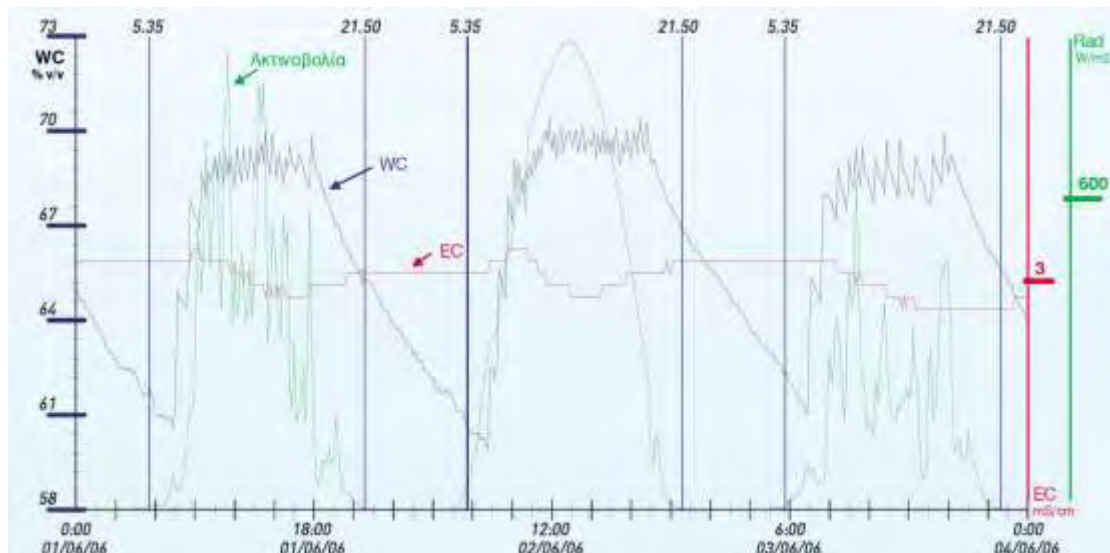
στη υπόλοιπη διάρκεια της ημέρας η υγρασία στα επιθυμητά επίπεδα και να γίνει επαναφορά της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα επιθυμητά επίπεδα. Η έναρξη απορροής σηματοδοτεί την λήξη της φάσης αυτής (για την περίοδο της άνοιξης πρέπει να συμβαίνει όταν η ηλιακή ακτινοβολία (στο εξωτερικό του θερμοκηπίου) είναι στα επίπεδα των 600Wm^{-2}).

- Στη δεύτερη φάση (Phase 2) κατά την οποία η ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές της ημέρας, ο κύριος στόχος είναι η διατήρηση της υγρασίας του υποστρώματος στα επιθυμητά επίπεδα (συνήθως εντός του Εύκολα Διαθέσιμου Νερού και όσο το δυνατόν εγγύτερα στην υδατοικανότητα φυτοδοχείου). Εάν συμβεί αυτό η αγωγιμότητα θα μειωθεί και θα μείνει στα επίπεδα αυτής του θρεπτικού διαλύματος με το οποίο γίνεται η άρδευση. Ο υπολογισμός της δόσης άρδευσης πρέπει να λάβει υπόψη του τις ανάγκες της καλλιέργειας σε φυτό όπως αυτές διαμορφώνονται από τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά και το μικροκλίμα του θερμοκηπίου). Μία ακόμη παράμετρος ελέγχου της φάσης αυτής είναι το πότε θα γίνει η τελευταία άρδευση⁴⁴ ώστε να μην πέσει πολύ η υγρασία και αυξηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η τελευταία άρδευση σηματοδοτεί τη λήξη της φάσης αυτής.
- Κατά την τρίτη φάση (Phase 3) κατά κανόνα δεν γίνονται αρδεύσεις και παρατηρείται μία πτώση της υγρασίας υποστρώματος (σε κάθε περίπτωση αυτή πρέπει να παραμένει κοντά στην υδατοικανότητα φυτοδοχείου, ως μέγιστη πτώση ορίζεται το 10%) και αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας λόγω της αύξησης της συγκέντρωσης των αλάτων (η μείωση υγρασίας στο υπόστρωμα δεν συνδυάζεται με προσρόφηση θρεπτικών από τα φυτά).

Στην Εικόνα 74 παρουσιάζεται μια τυπική διακύμανση της υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος (πετροβάμβακα) συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα πρόγραμμα άρδευσης που ακολουθεί την προαναφερθείσα στρατηγική. Γραφήματα όπως αυτό βοηθούν το διαχειριστή του συστήματος να αντιληφθεί τις τάσεις (περίοδοι 7-10 ημερών) και τις λεπτομέρειες (γραφήματα 1-2 ημερών) και να προγραμματίσει αντίστοιχα τις παραμέτρους ακτινοβολίας, χρόνου και δόσης που σχετίζονται με την παροχή θρεπτικού διαλύματος (άρδευση).

πρώτη άρδευση η πρώτη απορροή θα γίνει επίσης πολύ γρήγορα (αφού η ζήτηση για νερό θα είναι μειωμένη) και η αγωγιμότητα θα βρεθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

⁴⁴ Δεν πρέπει να γίνει πολύ αργά μία φωτεινή ημέρα ή πολύ αργά μία νεφосκεπή ημέρα.

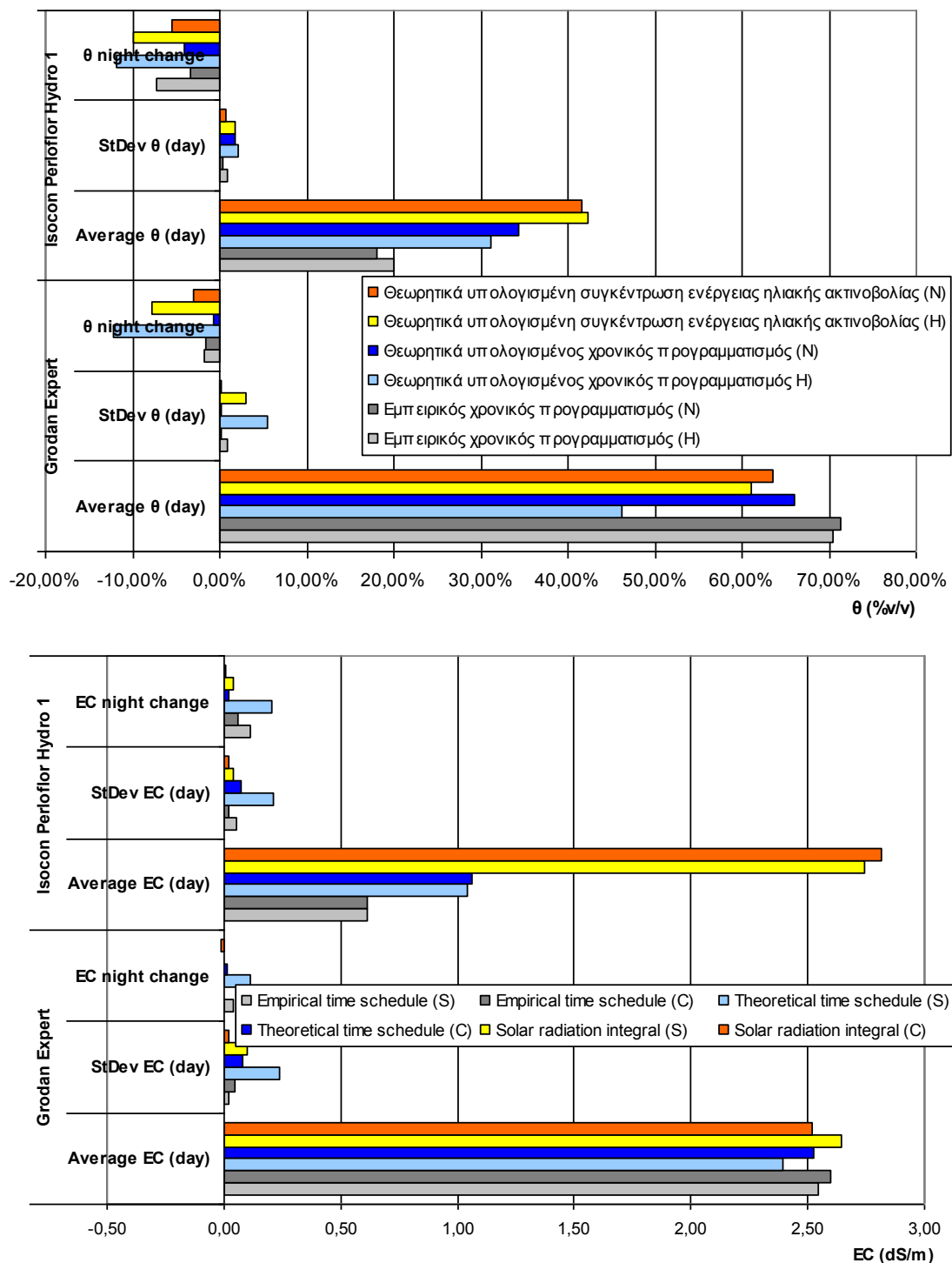


Εικόνα 74 Εφαρμογή στρατηγικής διαχείρισης άρδευσης (Lee, 2010)

Σύγκριση προσεγγίσεων διαχείρισης άρδευσης

Στην Εικόνα 75 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις ημέρας καθώς και μέση μεταβολή νύχτας της θ (%v/v) και της EC (dS/m) για τα δύο υποστρώματα (μετρήσεις με Grodan VCM-Control) για τις τρεις περιόδους άρδευσης. Στις τιμές περιλαμβάνονται τόσο ηλιόλουστες όσο και νεφοσκεπείς ημέρες. Γίνεται διαχωρισμός μεταξύ ηλιόλουστων ημερών (H, μετρημένη ηλιακή ενέργεια > 50% της θεωρητικά υπολογισμένης για την ημέρα και την τοποθεσία) και νεφοσκεπών (N, μετρημένη ηλιακή ενέργεια < 50% της θεωρητικά υπολογισμένης για την ημέρα και την τοποθεσία) ημερών.

Είναι καταρχήν φανερό ότι κατά τις ηλιόλουστες ημέρες, όπου η ζήτηση για νερό είναι εντονότερη, τα επίπεδα υγρασίας στα υποστρώματα είναι σε χαμηλότερο επίπεδο σε σχέση με τις νεφοσκεπείς. Ακόμη τις ηλιόλουστες ημέρες έχουμε και μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τις ηλιόλουστες ημέρες είχαμε και την μεγαλύτερη νυχτερινή πτώση υγρασίας λόγω της υψηλής ζήτησης στην αρχή της ημέρας (πριν από την πρώτη άρδευση). Όσο αφορά την EC πάλι η μεγαλύτερη αύξηση τη νύχτα γίνονταν τις ηλιόλουστες ημέρες (για τους λόγους που αναφέρθηκαν).



Εικόνα 75 Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις ημέρας καθώς και μέση μεταβολή νύχτας της θ (%w/v) και της EC (dS/m) για τα δύο υποστρώματα (μετρήσεις με Grodan VCM-Control), για ηλιόλουστες (H) και νεφосκεπείς (N) ημέρες για τις τρεις περιόδους άρδευσης

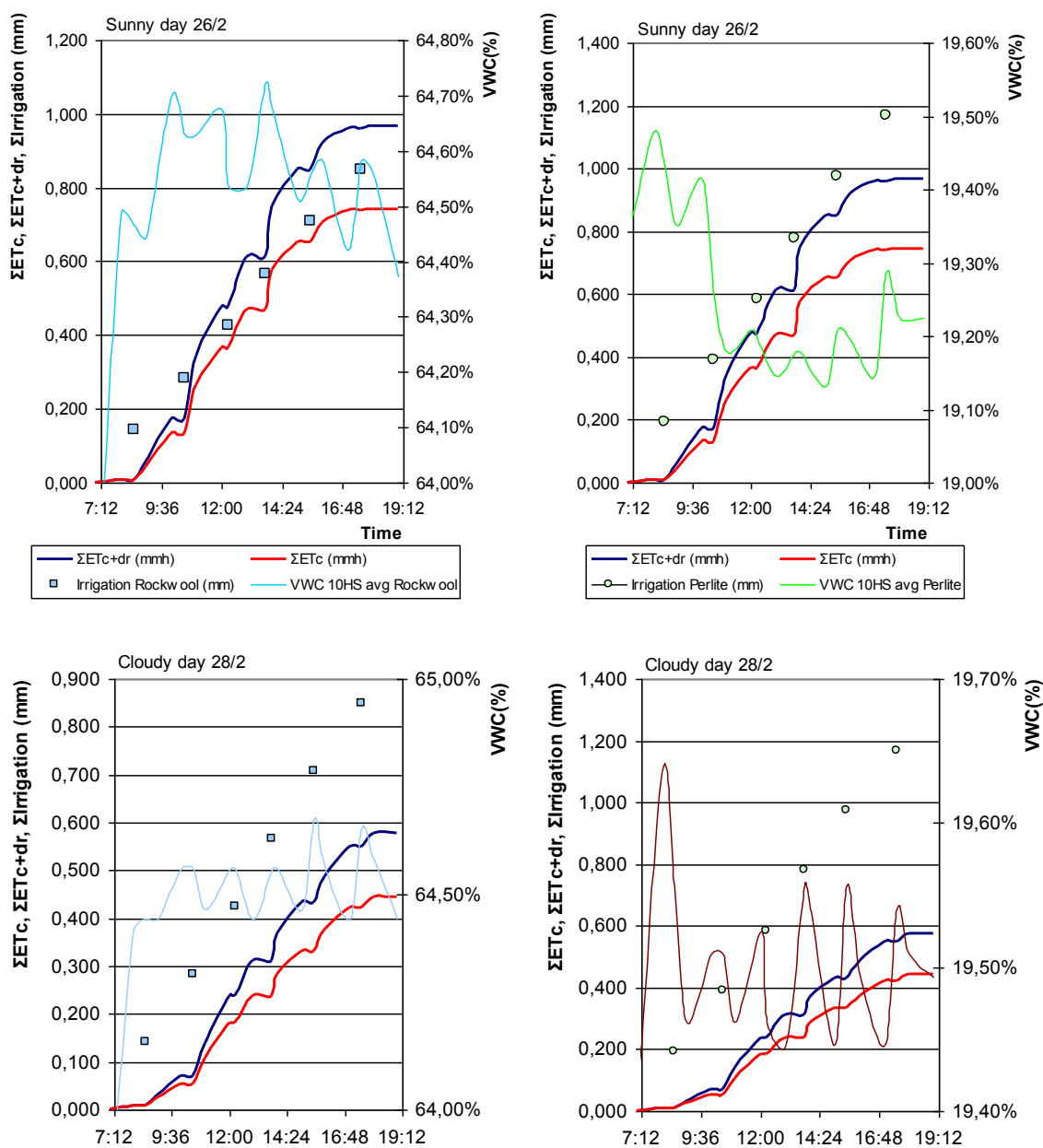
Στη συνέχεια (Εικόνα 76, Εικόνα 77 και Εικόνα 78) παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία της εξατμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξατμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού και της υγρασίας υποστρώματος για χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη και μία νεφосκεπή) για κάθε μία από τις περιόδους άρδευσης. Σε κάθε περίπτωση η ζητούμενη απορροή ήταν 30%. Ο υπολογισμός των αναγκών σε νερό έγινε με την προσέγγιση που περιγράφεται από τους Katsoulas κ.α. (2006).

Κατά την πρώτη περίοδο (εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός, 6 αρδεύσεις ανά ημέρα Εικόνα 76) φαίνεται ότι η πραγματική απορροή ήταν της τάξης του 14% για τον πετροβάμβακα και 57% για τον περλίτη κατά τις ηλιόλουστες ημέρες και του 92% και 164% αντίστοιχα κατά τις νεφосκεπείς.

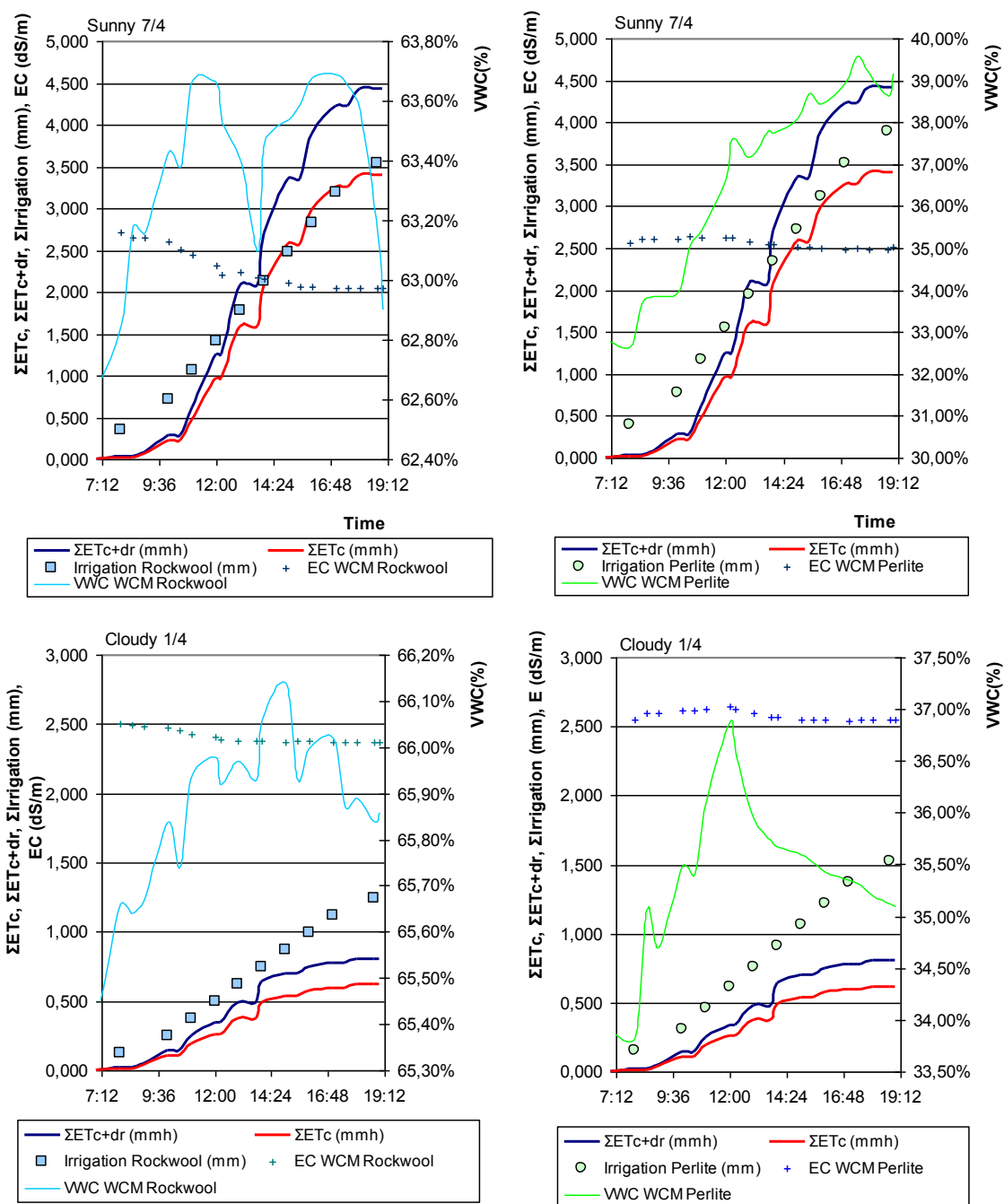
Κατά την δεύτερη περίοδο (θεωρητικός χρονικός προγραμματισμός, 10 αρδεύσεις ανά ημέρα, Εικόνα 77), η πραγματική απορροή εκτιμήθηκε στο 4% και 15% για πετροβάμβακα και περλίτη αντίστοιχα κατά τη διάρκεια των ηλιόλουστων ημερών ενώ αντίθετα στις νεφосκεπείς ημέρες η πραγματική απορροή εκτιμήθηκε στο 101% και 147% πάνω από εξατμισοδιαπνοή.

Κατά την τρίτη περίοδο (προγραμματισμός με βάση την ηλιακή ακτινοβολία, Εικόνα 78) στις ηλιόλουστες ημέρες γίνονταν 16 και 13 ποτίσματα στον πετροβάμβακα και στον περλίτη αντίστοιχα ενώ στις νεφосκεπείς 4 και 3. Η πραγματική απορροή εκτιμήθηκε στα 39 και 38% κατά τις ηλιόλουστες ημέρες και 64% και 44% κατά τις νεφосκεπείς.

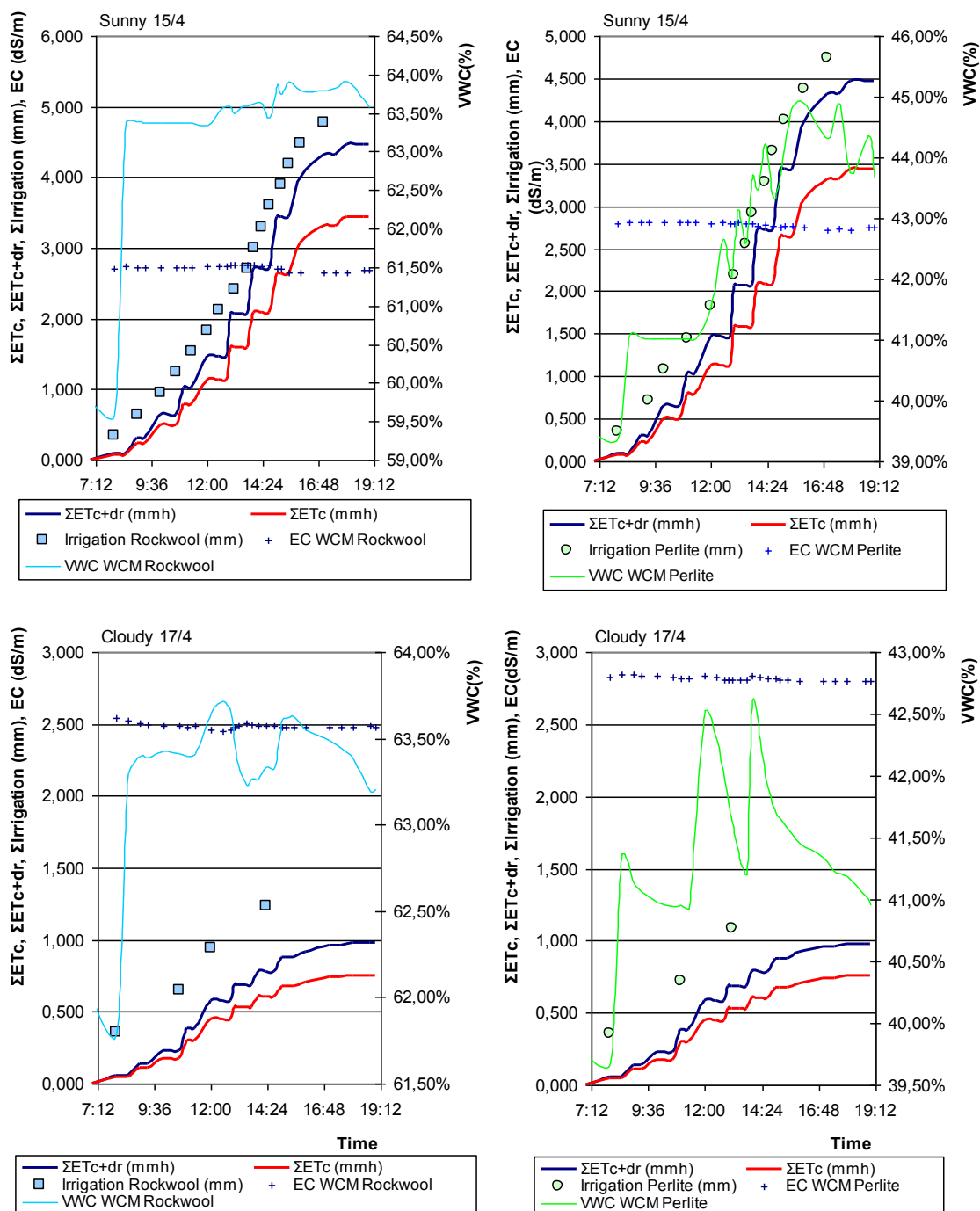
Κατά της δύο τελευταίες περιόδους υπήρχε η δυνατότητα καταγραφής ενδείξεων και σχετικά με την EC. Η EC φαίνεται γενικά να μένει στα επίπεδα του 2,5 dS/m.



Εικόνα 76 Ημερήσια πορεία της εξατμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξατμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού και της υγρασίας υποστρώματος για δύο χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη (26/2) και μία νεφосκεπή (28/2)) κατά την πρώτη περίοδο άρδευσης (εμπειρικός χρονικός υπολογισμός).



Εικόνα 77 Ημερήσια πορεία της εξαμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξαμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού, της υγρασίας υποστρώματος και της EC για δύο χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη (7/4) και μία νεφосκεπή (1/4)) κατά την δεύτερη περίοδο άρδευσης (θεωρητικά υπολογισμένος χρονικός προγραμματισμός).



Εικόνα 78 Ημερήσια πορεία της εξατμισοδιαπνοής, της απαίτησης νερού (εξατμισοδιαπνοή και απορροή), της παροχής νερού, της υγρασίας υποστρώματος και της EC για δύο χαρακτηριστικές ημέρες (μία ηλιόλουστη (15/4) και μία νεφосκεπή (17/4)) κατά την δεύτερη περίοδο άρδευσης (αυτόματος προγραμματισμός με βάση την ηλιακή ακτινοβολία).

Αξιολόγηση μετρήσεων κατά την πρώτη περίοδο χρονικού προγραμματισμού (εμπειρικός προγραμματισμός)

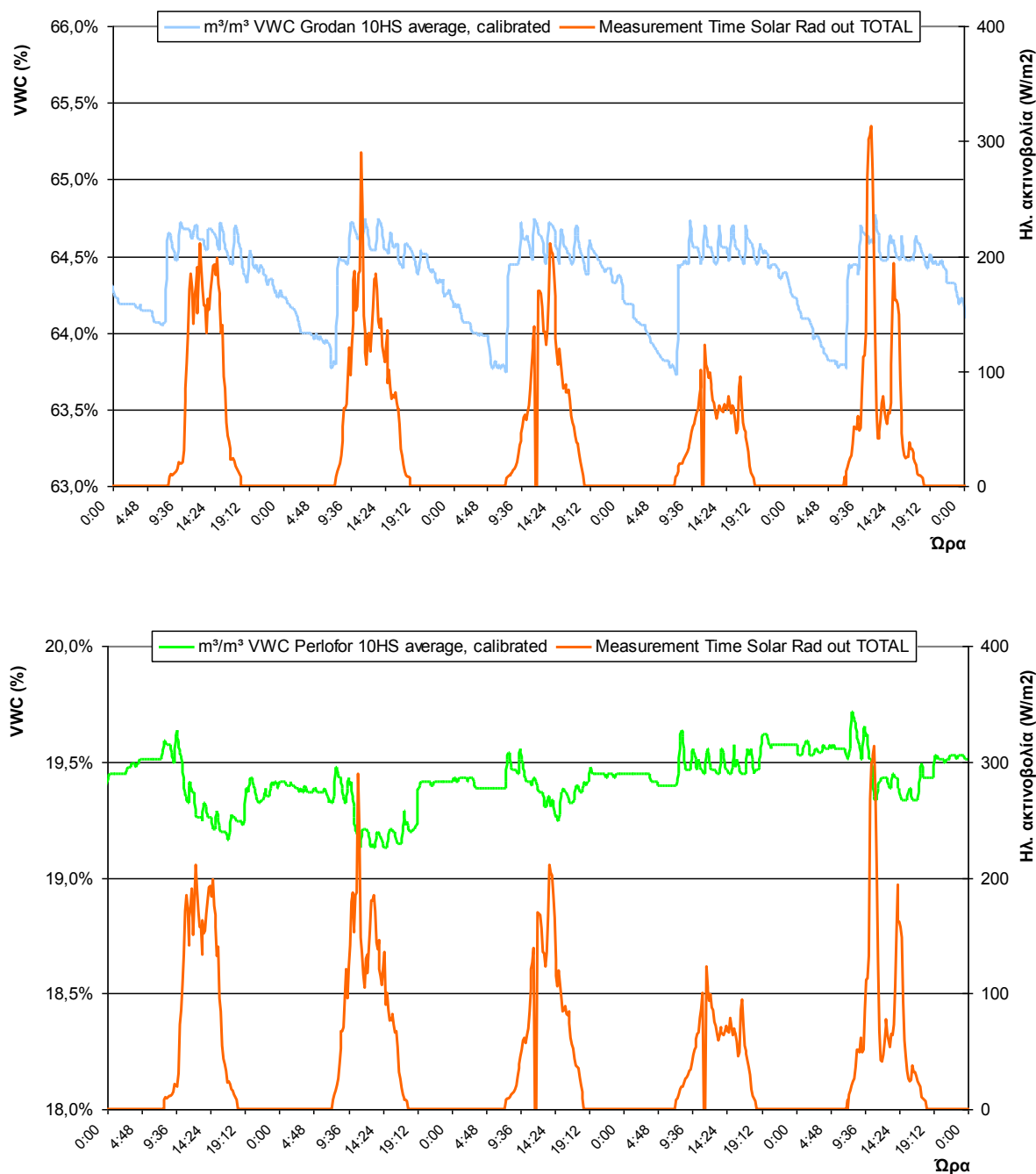
Κατά την πρώτη περίοδο χρονικού προγραμματισμού (εμπειρικό πρόγραμμα) οι μόνοι αισθητήρες που ήταν εγκατεστημένοι στο υπόστρωμα ήταν οι 10HS (Decagon). Όλοι οι αισθητήρες (4 για κάθε υπόστρωμα) ήταν εγκατεστημένοι σε σάκους με 3 φυτά, στο μέσον της απόστασης 2 φυτών, καρφωτοί από πάνω (για εύκολη αναφορά θέσης τοποθέτησης). Στον πετροβάμβακα δεν υπήρχε περιθώριο όμως καθώς το μήκος ακίδων ήταν 10cm, και το πάχος υποστρώματος 7,5cm) έτσι μπήκαν με μία μικρή κλίση καταλαμβάνοντας όμως όλο το διαθέσιμο ύψος (από 0 έως 7,5cm). Αξίζει να αναφερθεί ότι αυτού του είδους η τοποθέτηση δεν ακολουθεί (ιδίως για τον πετροβάμβακα) τις γενικές συστάσεις της Decagon (2009) για τις αποστάσεις από τα όρια του υποστρώματος και την διεύθυνση ως προς τη φορά κίνησης του νερού για το συγκεκριμένο αισθητήρα.

Στην Εικόνα 79 παρουσιάζεται η διακύμανση υγρασίας υποστρώματος σε πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένους από επάνω) κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων και νεφοσκεπών ημερών στο τέλος του χειμώνα (25/2/2011 έως 1/3/2011). Είναι χαρακτηριστικό ότι στον πετροβάμβακα οι τιμές της υγρασίας αν και ακολουθούν το επιθυμητό μοτίβο και καταγράφουν τα αρδευτικά γεγονότα, έχουν πολύ μικρές διακυμάνσεις στη διάρκεια της ημέρας. Αυτό πρέπει να αποδοθεί κυρίως στον τρόπο τοποθέτησης του αισθητήρα και στο μεγάλο όγκο της περιοχής δείγματος που αντιστοιχεί σε αυτόν. Στον περλίτη πέρα από το ζήτημα των μικρών διακυμάνσεων, υπάρχει το σοβαρό πρόβλημα του ότι η παροχή νερού δεν καλύπτει τη ζήτηση και έτσι τις πρώτες απογευματινές ώρες των ηλιόλουστων ημερών, η υγρασία αντί να μένει σταθερή σε κάποιο επίπεδο, παρουσιάζει πτώση.

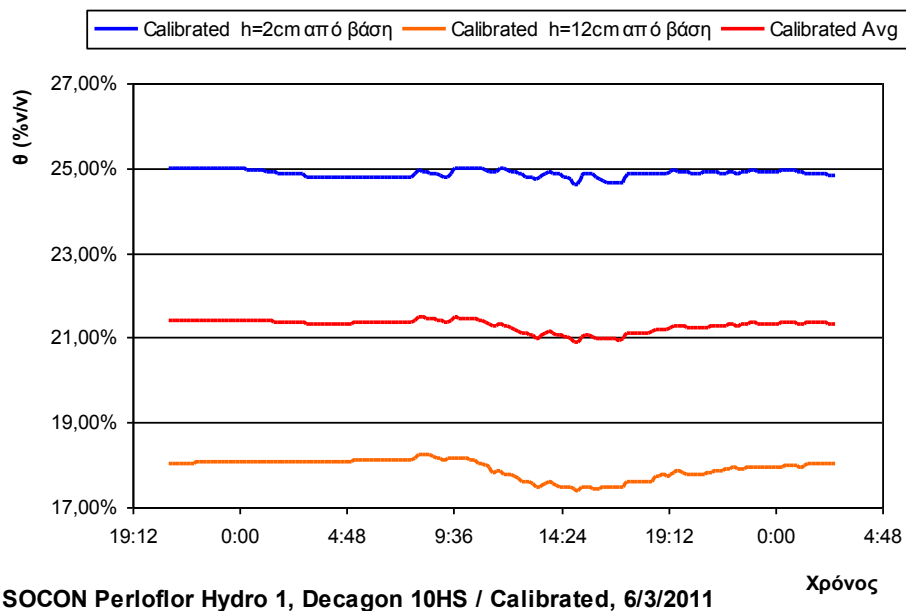
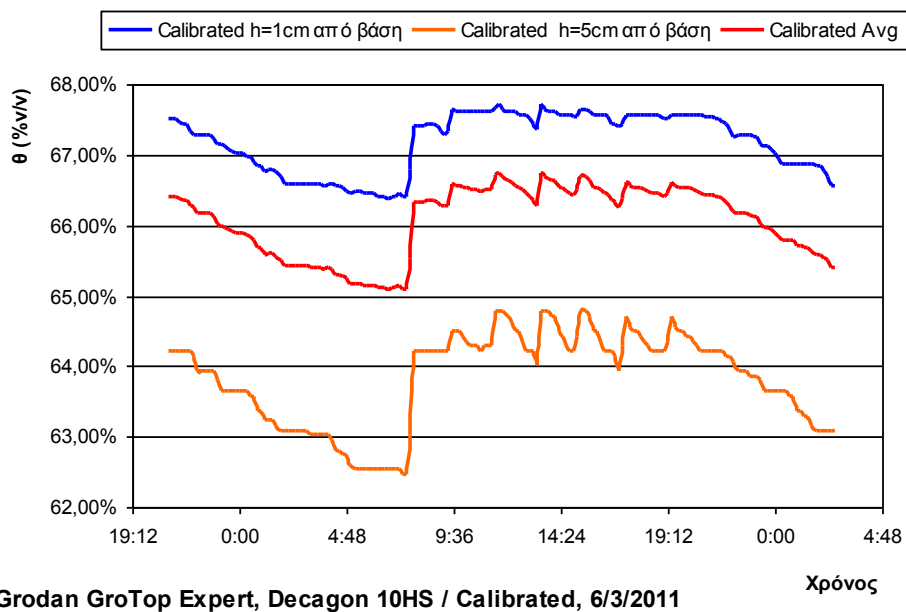
Στην Εικόνα 80 παρουσιάζεται η μεταβολή της υγρασίας σε διάφορα ύψη εντός των υποστρωμάτων. Παρόλο το μεγάλο όγκο δείγματος του αισθητήρα (Decagon 10HS που έχει τοποθετηθεί οριζόντια με το επίπεδο των ακίδων παράλληλα με τις οριζόντιες πλευρές των σάκων) φαίνεται η μεταβολή της υγρασίας με το ύψος εντός ενός υποστρώματος (περισσότερη υγρασία στη βάση, λιγότερη στην κορυφή). Οι μικρότερες μεταβολές στον πετροβάμβακα οφείλονται στην ειδική διαστρωμάτωσή του ώστε να συγκρατεί αρκετή υγρασία και στο επάνω μέρος του).

Στην συνέχεια και πάντα κατά την περίοδο του πρώτου χρονικού προγραμματισμού (εμπειρικό πρόγραμμα), οι αισθητήρες 10HS τοποθετήθηκαν σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή, στη μέση του υποστρώματος (κάθετα προς τις

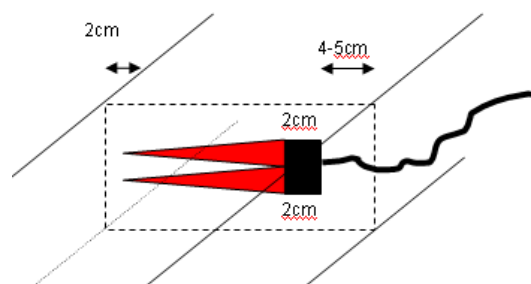
οριζόντιες επιφάνειες του υποστρώματος για καλύτερη αντίδραση στη ροή νερού προς τα κάτω, Εικόνα 81).



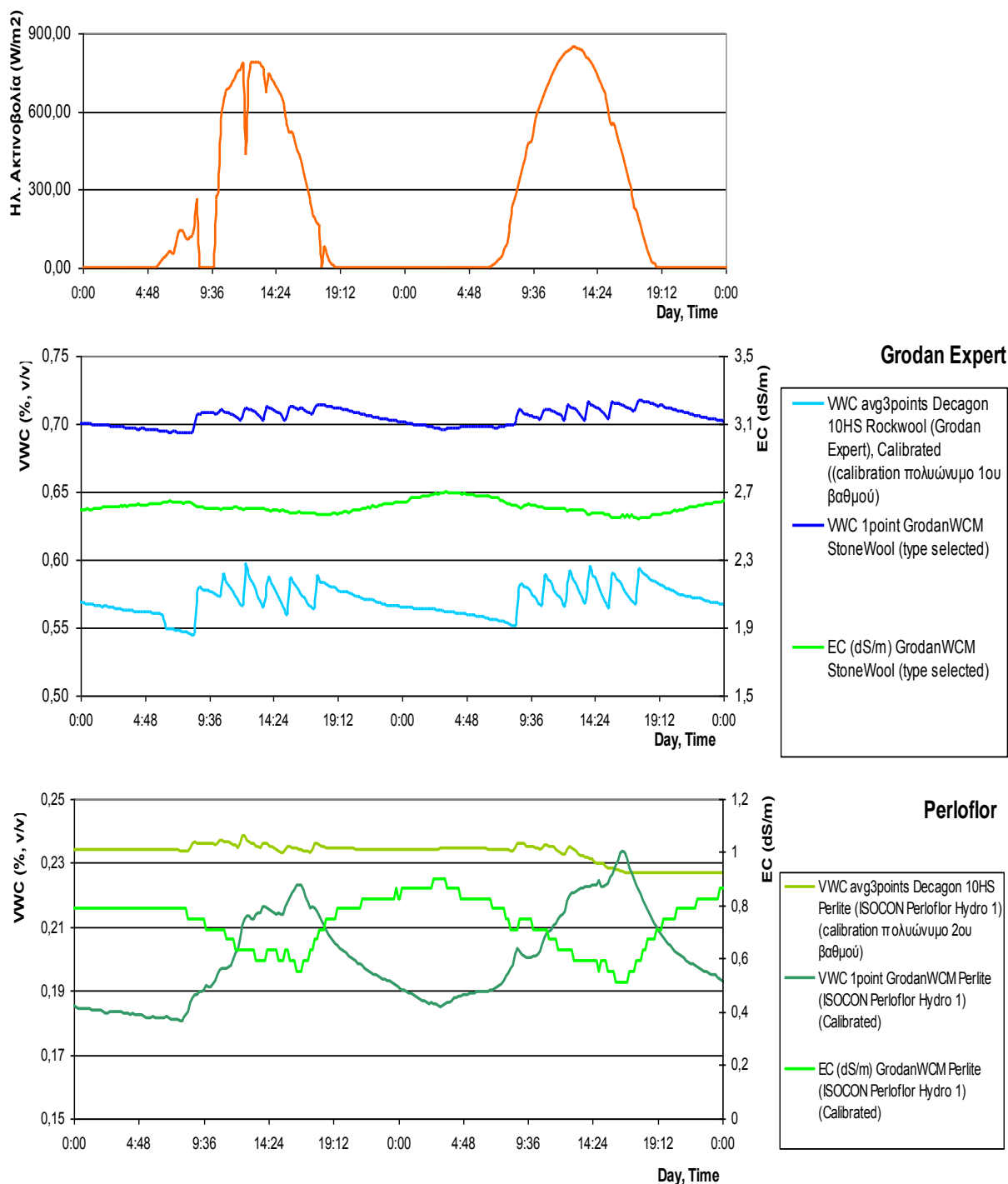
Εικόνα 79 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένοι από επάνω) κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων και νεφοσκεπών ημερών στο τέλος του χειμώνα (25/2/2011 έως 1/3/2011). Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός.



Εικόνα 80 Επίπεδα υγρασίας υποστρώματος σε πετροβάμβακα και περλίτη σε διάφορα ύψη από τη βάση του υποστρώματος. Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός



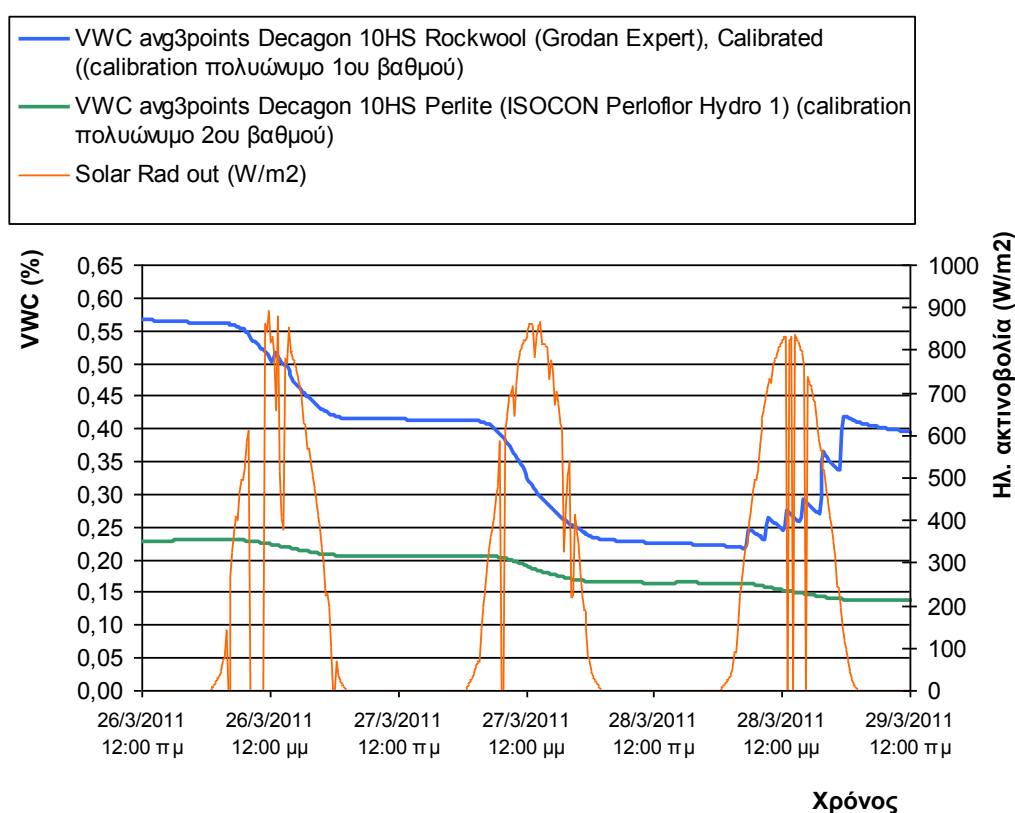
Εικόνα 81 Τοποθέτηση αισθητήρα 10HS κάθετα προς τις οριζόντιες επιφάνειες του υποστρώματος



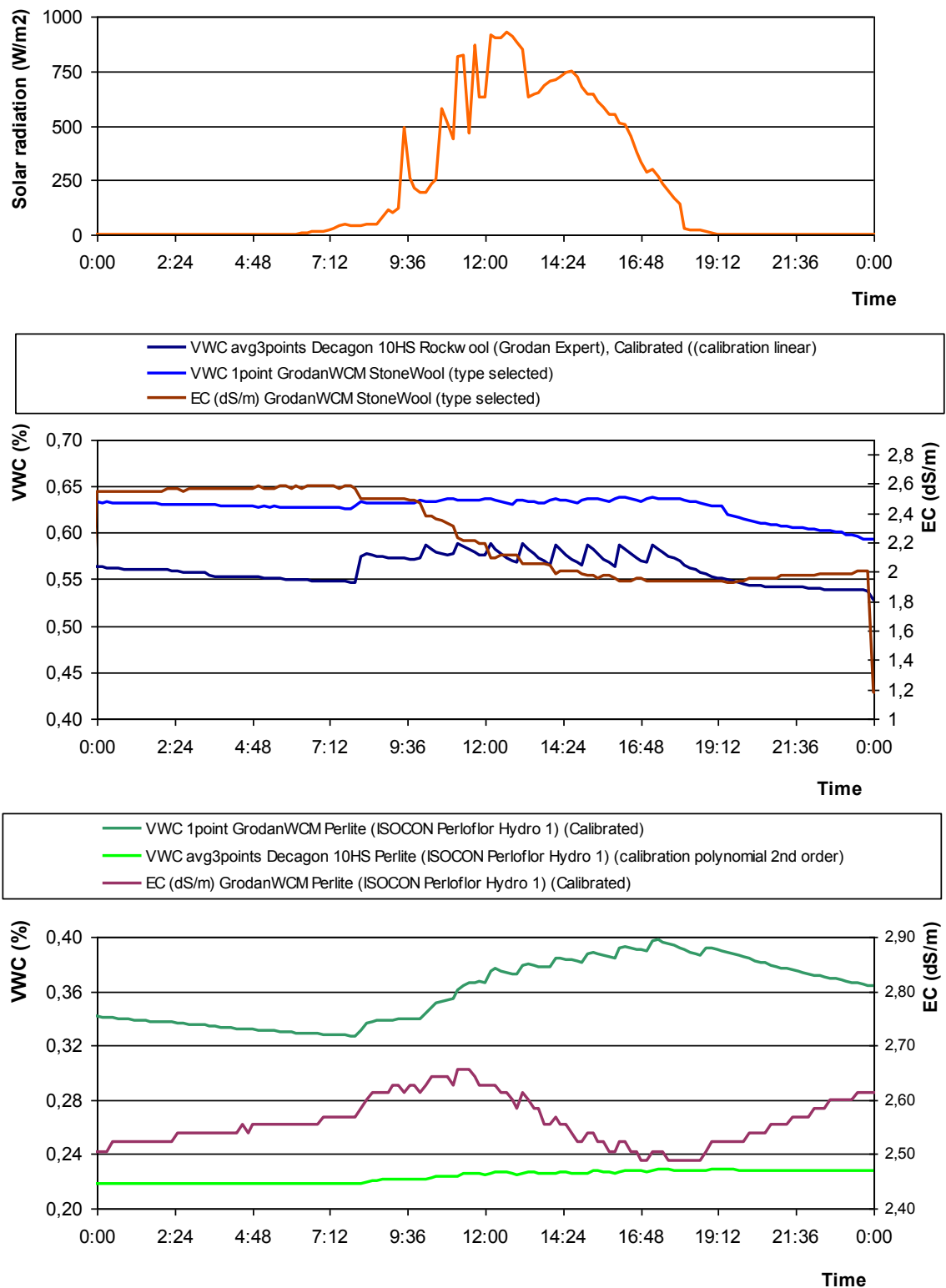
Εικόνα 82 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένους από το πλάι σύμφωνα με οδηγίες κατασκευαστή) στις αρχές της άνοιξης (24-25/3/2011). Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός.

Την ίδια περίοδο εγκαταστάθηκαν (από πάνω, σε απόσταση 10-15 cm από σταλάκτες, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή) σε χαρακτηριστικές θέσεις του υποστρώματος (μετά από σειρά δοκιμών) δύο αισθητήρες Grodan WCM-Control (ένας σε κάθε υπόστρωμα). Στην Εικόνα 82 παρουσιάζονται σχετικές μετρήσεις κατά

τη διάρκεια δύο τυπικών ηλιόλουστων ημερών. Είναι φανερό ότι οι αισθητήρες της Grodan δίνουν συνεχώς μεγαλύτερες τιμές υγρασίας από το μέσο όρο των αισθητήρων 10HS στον πετροβάμβακα. Στον περλίτη συμβαίνει το αντίστροφο αλλά οι τιμές των δύο μετρήσεων είναι σε πολύ κοντινότερα επίπεδα. Σε κάθε περίπτωση φαίνεται ότι μετά τη νυχτερινή πτώση (λιγότερη του 10% σε κάθε περίπτωση) η υγρασία υποστρώματος αυξάνεται σταδιακά μετά την πρώτη άρδευση και στην συνέχεια παραμένει έως αργά το απόγευμα κοντά στην υδατοικανότητα φυτοδοχείου. Στον περλίτη φαίνεται (σύμφωνα με τα δεδομένα του Grodan WCM) ότι η τελευταία άρδευση θα μπορούσε και να μη γίνεται.



Εικόνα 83 Επίδραση διακοπής άρδευσης σε υγρασία υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Decagon 10HS τοποθετημένους από το πλάι σύμφωνα με οδηγίες κατασκευαστή) στις αρχές της άνοιξης (26-29/3/2011). Εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός.



Εικόνα 84 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα και περλίτη (μέτρηση με Grodan WCM και Decagon 10HS) στα μέσα της άνοιξης (7/4/2011). Θεωρητικά υπολογισμένος χρονικός προγραμματισμός

Ο αισθητήρας της Grodan δίνει και τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, από τις οποίες είναι φανερό ότι η αγωγιμότητα είναι σταθερότερη και κινείται σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα στον πετροβάμβακα σε σχέση με τον περλίτη. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχει την αναμενόμενη πορεία καθώς αυξάνεται στη διάρκεια της νύχτας και μειώνεται κάποια στιγμή μετά τις πρώτες αρδεύσεις.

Κατά την περίοδο αυτή για 2 ημέρες είχε σταματήσει η άρδευση (Εικόνα 83). Στον πετροβάμβακα αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πτώση της υγρασίας από το 57% στο 22% ενώ στον περλίτη από 22,5% στο 13%. Σημειώνεται ότι οι οπτικές ενδείξεις υδατικής καταπόνησης (εικόνα μαραμένου φυτού, συστροφή φύλλων) ήταν πολύ εντονότερες στον πετροβάμβακα.

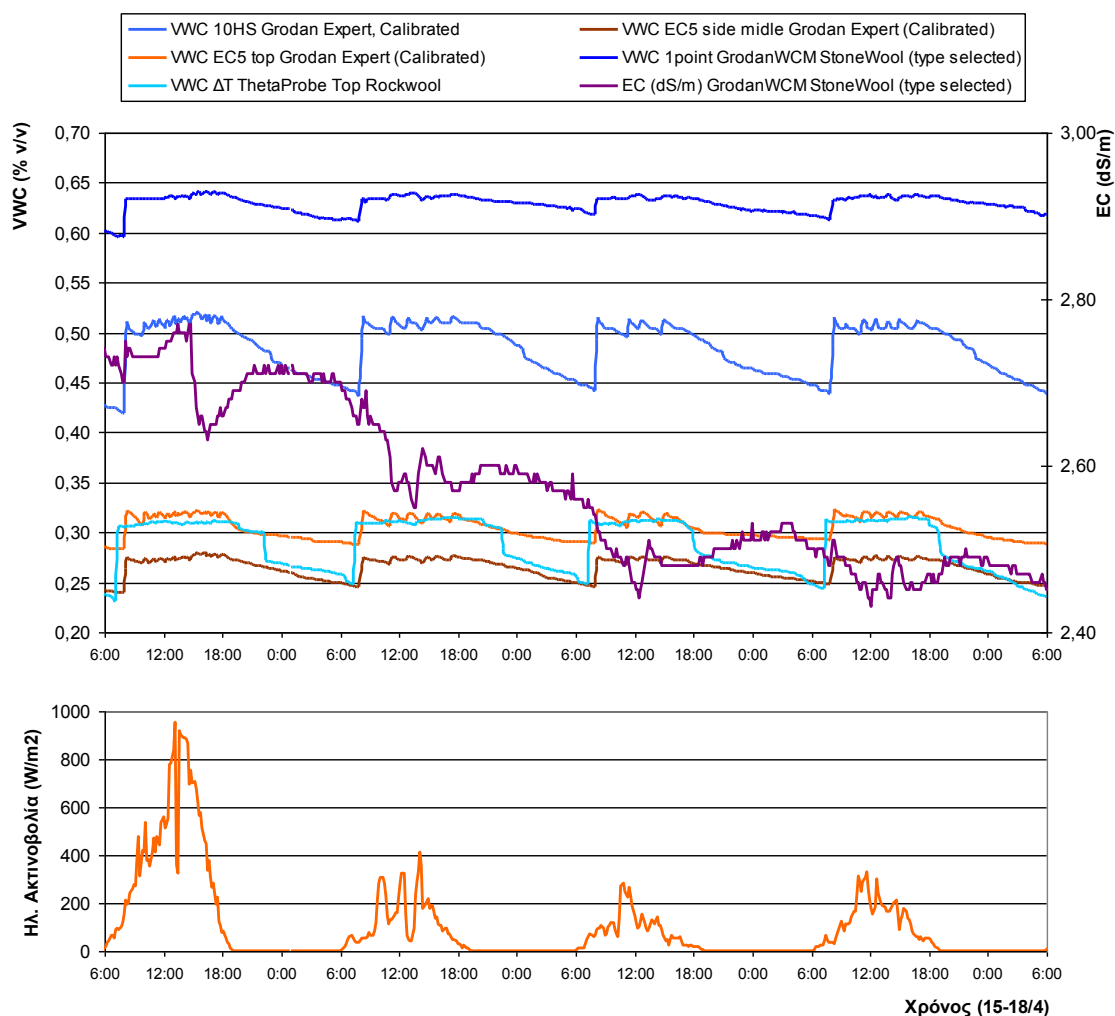
Αξιολόγηση μετρήσεων κατά την δεύτερη περίοδο χρονικού προγραμματισμού (θεωρητικός υπολογισμός)

Στην περίοδο του θεωρητικά υπολογισμένου χρονικού προγραμματισμού (Εικόνα 84) η κατάσταση δεν αλλάζει πολύ ως προς τα βασικά μοτίβα. Όλες οι τιμές υγρασίας και αγωγιμότητας παραμένουν εντός των αποδεκτών επιπέδων. Μεγαλύτερες διαφορές αποτελούν:

- η συνεχής διατήρηση του πετροβάμβακα σε επίπεδα υγρασίας κοντά στην υδατοικανότητα και η διατήρηση των επιπέδων ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- η διατήρηση του περλίτη σε υψηλότερα επίπεδα υγρασίας, πολύ κοντά στην υδατοικανότητα με αύξηση όμως του επιπέδου ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

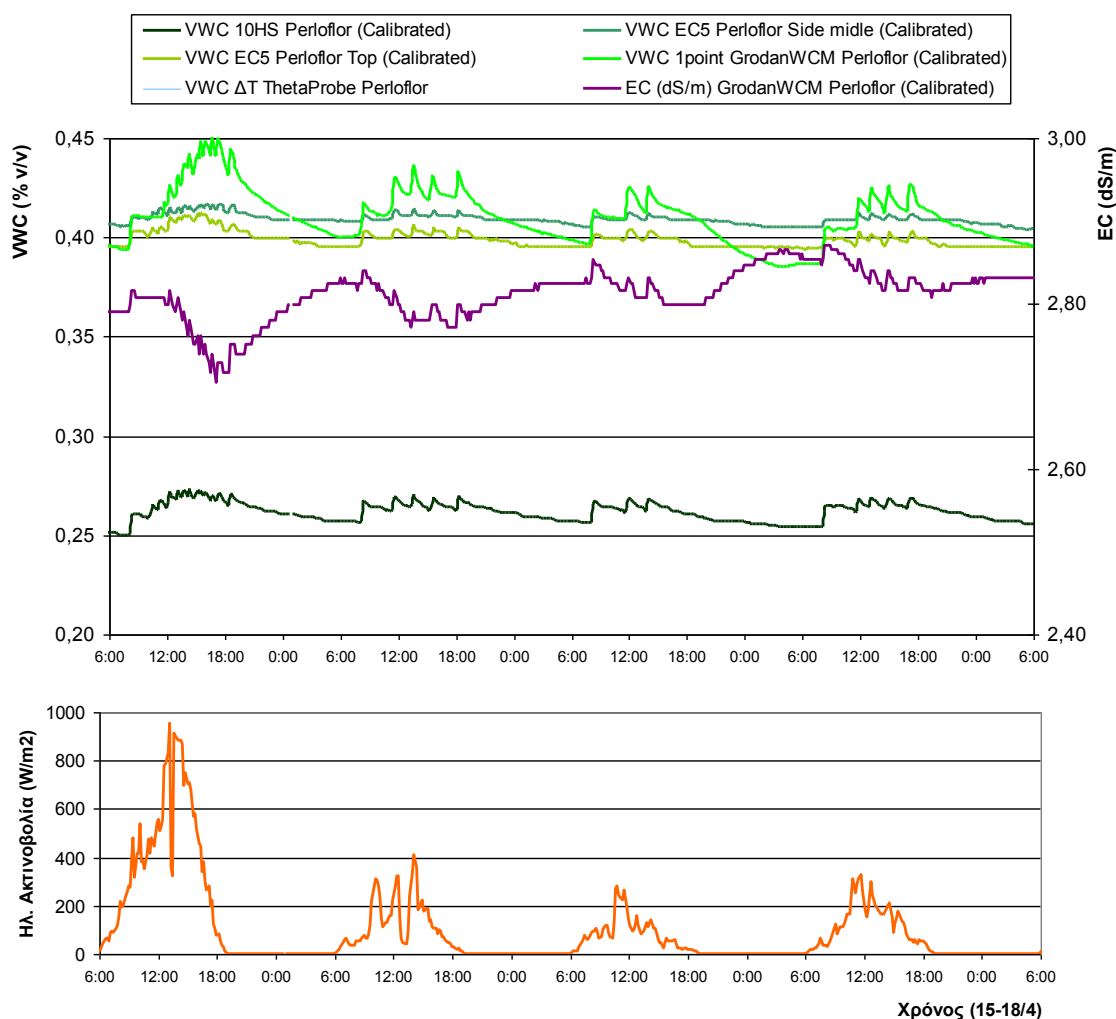
Αξιολόγηση μετρήσεων κατά την περίοδο διαχείρισης με βάση τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας

Στην συνέχεια, όπως αναφέρθηκε εφαρμόστηκε προγραμματισμός με βάση τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 85, στον πετροβάμβακα, τα αναμενόμενα τυπικά μοτίβα ακολουθούνται ως προς την υγρασία ενώ το σχετικά περισσότερο νερό που δίνονταν με την διαχείριση με βάση τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας οδήγησε σε μία βαθμιαία πτώση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (είχε ανέβει ψηλά κατά τη διάρκεια μίας περιόδου βλάβης του αρδευτικού που προηγήθηκε). Σε κάθε περίπτωση όμως το αναμενόμενο μοτίβο ημερήσιας διακύμανσής της ήταν το αναμενόμενο.



Εικόνα 85 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος πετροβάμβακα (μέτρηση με διάφορους τύπου αισθητήρων, σε διάφορες θέσεις) κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων και νεφосκεπών ημερών στα μέσα της άνοιξης (15/4/2011 έως 18/4/2011). Προγραμματισμός με ολοκλήρωση ηλιακής ακτινοβολίας.

Όλοι οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν εκφράζουν το αναμενόμενο τυπικό μοτίβο αλλά σε διαφορετικά επίπεδα υγρασίας. Αυτό πιθανότατα οφείλεται τόσο στον όγκο περιοχής δείγματος του καθενός όσο και στα χαρακτηριστικά της θέσης στην οποία είναι εγκατεστημένοι. Τα χαμηλότερα επίπεδα (μέτρηση σε ένα σημείο, επίπεδο 32%) δίνει ο ThetaProbe, παρουσιάζοντας επίσης και τις μικρότερες ημερήσιες διακυμάνσεις. Στο άλλο άκρο (μέτρηση σε ένα σημείο, επίπεδο 64%) είναι ο VCM ο οποίος δίνει τις μεγαλύτερες τιμές, παρουσιάζοντας όμως και αυτός μικρές ημερήσιες διακυμάνσεις. Οι 10HS και οι EC5, τοποθετημένοι και οι δύο από το πλάι, δίνουν παρόμοια επίπεδα τιμών (μέσες τιμές 3 σημείων για τον καθένα και επίπεδα υγρασίας 50 και 47% αντίστοιχα). Οι EC5 (επίπεδα 57%) τοποθετημένοι από πάνω δίνουν τις εντονότερες διακυμάνσεις μεταξύ των αρδεύσεων.



Εικόνα 86 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος περλίτη (μέτρηση με διάφορους τύπου αισθητήρων, σε διάφορες θέσεις) κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων και νεφосκεπών ημερών στα μέσα της άνοιξης (15/4/2011 έως 18/4/2011). Προγραμματισμός με ολοκλήρωση ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 86, και στο περλίτη, τα αναμενόμενα τυπικά μοτίβα ακολουθούνται ως προς την υγρασία. Εδώ παρουσιάζεται πάλι το διαφορετικό επίπεδο μετρήσεων για τους διάφορους τύπους αισθητήρα. Οι αισθητήρες EC5 στην περίπτωση του περλίτη δεν έδιναν πολύ διαφορετικά επίπεδα εάν ήταν τοποθετημένοι από το πλάι ή από την επάνω πλευρά (επίπεδα 24%). Οι αισθητήρες 10HS έδιναν ελαφρώς μεγαλύτερα επίπεδα υγρασίας (27%). Και οι δύο αυτοί τύποι αισθητήρων έδιναν μικρές διακυμάνσεις στη διάρκεια της ημέρας. Ο WCM από την άλλη έδινε υγρασία (42%) πάνω από τα επίπεδα της υδατοικανότητας φυτοδοχείου. Η EC ακολουθούσε το αναμενόμενο μοτίβο και έμεινε στα επίπεδα που είχε και κατά την εφαρμογή του θεωρητικά υπολογισμένου χρονικού προγραμματισμού.

Αξιολόγηση προγραμματισμού με βάση την ηλιακή ακτινοβολία μόνο και προγραμματισμού με συνδυασμό συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας και υγρασίας υποστρώματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο αισθητήρας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί (μέσω της ολοκλήρωσης της ενέργειας) να καθορίσει τη συχνότητα της άρδευσης με έμμεσο αλλά γενικά αποδεκτό τρόπο. Όσο αφορά το θέμα της δόσης, αυτή εισάγεται ως ο χρόνος λειτουργίας της αντλίας κάθε στάσης. Αισθητήρες μέτρησης της υγρασίας υποστρώματος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον αυτόματο καθορισμό της δόσης άρδευσης μέσω κατάλληλων τιμών ρύθμισης (set point). Επειδή όμως στην αρχή της ημέρας η υγρασία στο υπόστρωμα αυξάνεται προοδευτικά έως ότου φθάσει στο μέσο επιθυμητό επίπεδο της ημέρας δεν είναι δυνατό με χρήση μίας μόνο τιμής ρύθμισης να χρησιμοποιηθεί αισθητήρας υγρασίας υποστρώματος και για τον έλεγχο της συχνότητας άρδευσης. Στο πλαίσιο αυτό έγινε αξιολόγηση δύο τρόπων ρύθμισης άρδευσης σε υπόστρωμα περλίτη:

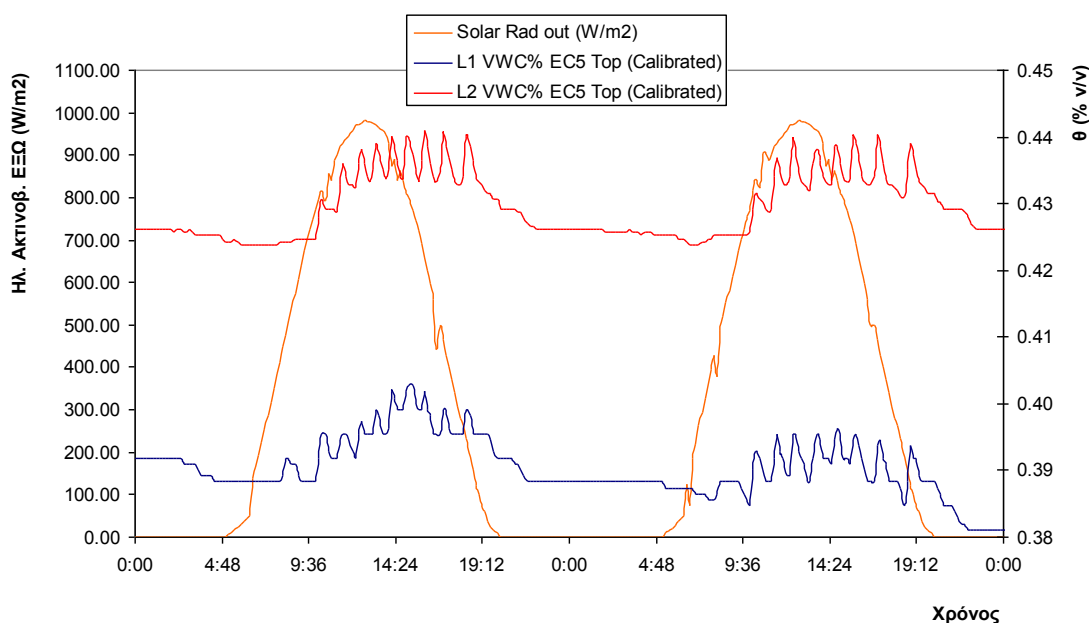
- ρύθμιση της συχνότητας με βάση την συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας και της δόσης με εισαγωγή χρόνου λειτουργίας αντλίας, ίδιο με το πρόγραμμα που χρησιμοποιούνταν κατά την περίοδο ελέγχου με συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας (Line 1):
 - ο συχνότητα: άρδευση ανά 700Wh με περίοδο ολοκλήρωσης από 8:00-19:00,
 - ο δόση: διάρκεια άρδευσης 9min και
 - ο επιπλέον: πρωινό πότισμα 5min στις 8:00,
- ρύθμιση της συχνότητας με βάση την συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας αλλά της δόσης με βάση την ένδειξη ενός αισθητήρα Decagon EC5 τοποθετημένου από πάνω σε αντιπροσωπευτικό σάκο περλίτη (Line 2):
 - ο συχνότητα: άρδευση ανά 700Wh με περίοδο ολοκλήρωσης από 8:00-19:00,
 - ο δόση: η διάρκεια άρδευσης καθορίζονταν από το χρόνο που θα χρειάζονταν η υγρασία να ανέβει κατά 0,7% σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε τη στιγμή έναρξης της άρδευσης
 - ο επιπλέον: βραδινό ή πρώτο πρωινό πότισμα εάν η υγρασία έπεφτε κάτω από 43% (περίοδος ελέγχου 24:00 έως 9:00).

Οι τιμές ρύθμισης για τη μεταχείριση που χρησιμοποιούσε και αισθητήρα υγρασίας υποστρώματος επιλέχθηκαν μετά από έλεγχο των καταγραφών της προηγούμενης περιόδου. Ακόμη στη μεταχείριση αυτή εγκαταστάθηκε και ένα δοχείο συλλογής

νερού άρδευσης με σκοπό την καταγραφή του συνολικού όγκου νερού που χορηγούνταν κατά τη διάρκεια κάθε ημέρας.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 87 και στις δύο μεταχειρίσεις υπήρχε συνδιακύμανση της υγρασίας υποστρώματος, αν και στην περίπτωση της ρύθμισης δόσης με αισθητήρα υγρασίας η υγρασία παρέμενε συνεχώς σε υψηλότερα επίπεδα (λόγω του σημείου ρύθμισης για βραδινό πότισμα).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και στις δύο περιπτώσεις ήταν στο επίπεδο του $0,5-1\text{dS m}^{-1}$, γεγονός όμως που οφείλονταν σε ανεξάρτητη της άρδευσης ρύθμισης σχετικά με την παρασκευή θρεπτικού διαλύματος. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα διατηρούνταν πάντα σε χαμηλότερα επίπεδα στην μεταχείριση με συνδυασμό ηλιακής ακτινοβολίας – αισθητήρα υγρασίας.



Εικόνα 87 Διακύμανση υγρασίας υποστρώματος κατά τη διάρκεια δύο ημερών (σύγκριση ελέγχου με μόνο ηλιακή ακτινοβολία (L1) σε σχέση με έλεγχο με συνδυασμό ηλιακής ακτινοβολίας και αισθητήρα υγρασίας υποστρώματος (L2)).

Συζήτηση και συμπεράσματα

Από όσα αναφέρθηκαν είναι προφανές ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα όσο αφορά την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης υγρασίας στο υπόστρωμα είναι η μεταβλητότητα των μετρήσεων η οποία εξαρτάται από τη θέση μέτρησης εντός του θερμοκηπίου, από τη θέση μέτρησης στο υπόστρωμα (πάνω, πλάι κοκ) όσο και από τον όγκο δείγματος μέτρησης του κάθε αισθητήρα. Πιθανότατα δεν είναι οι αισθητήρες το μεγαλύτερο πρόβλημα (εάν και σίγουρα μπορούν να γίνουν βελτιώσεις όσο αφορά τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά), αλλά μια σειρά από άλλες αιτίες που μπορεί

να είναι υπεύθυνες (αρδευτικό, πρόγραμμα κοκ) για τις αποκλίσεις που παρατηρούνται.

Ένα θέμα που εξετάστηκε ήταν εάν τελικά χρησιμοποιούσαμε αισθητήρες εδαφικής υγρασίας (π.χ. τους Decagon EC5 και τους Grodan WCM που είναι ειδικά σχεδιασμένοι για υποστρώματα υδροπονίας) ποια θα ήταν τα όρια τιμών για έλεγχο της άρδευσης κατά την ημέρα, για πιθανή άρδευση τη νύχτα και συναγερμούς σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην παροχή νερού; Για να εξεταστεί αυτό υπολογίστηκαν οι μέσες μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές ημέρας (10:00-19:00) για περίοδο 10 ημερών (εντός του Μάιου) για δύο προγράμματα άρδευσης με βάση την συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας:

- αρχική άρδευση με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία:
 - ο η άρδευση γίνονταν ανά 1080 kJ m^{-2} (280 Wh m^{-2}) και 1260 kJ m^{-2} (350 Wh m^{-2}) ενέργειας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου στον πετροβάμβακα και στον περλίτη αντίστοιχα,
 - ο η διάρκεια άρδευσης (ώστε να δοθεί η αντίστοιχη δόση) υπολογίστηκε στα 4min και 10sec και 5min και 10sec για το κάθε υπόστρωμα αντίστοιχα,
 - ο στις 8:00 κάθε πρωί γινόταν μία χρονικά προγραμματισμένη άρδευση (με διάρκεια 5min) και μηδενισμός του ολοκληρωτή ενέργειας, ενώ η ολοκλήρωση γινόταν έως τις 19:00 το απόγευμα.
- νέο πρόγραμμα άρδευσης με διεύρυνση της πτώσης υγρασίας μεταξύ των αρδεύσεων:
 - ο η άρδευση γίνονταν ανά 2520 kJ m^{-2} (700 Wh m^{-2}) στο εξωτερικό του θερμοκηπίου στον πετροβάμβακα και στον περλίτη,
 - ο η διάρκεια άρδευσης (ώστε να δοθεί η αντίστοιχη δόση) υπολογίστηκε στα 9min και για τα δύο υποστρώματα,
 - ο στις 8:00 κάθε πρωί γινόταν μία χρονικά προγραμματισμένη άρδευση (με διάρκεια 5min) και μηδενισμός του ολοκληρωτή ενέργειας, ενώ η ολοκλήρωση γινόταν έως τις 19:00 το απόγευμα.

Πίνακας 10 Πιθανές τιμές ορίων προγραμματισμού με αισθητήρες υγρασίας υποστρώματος, (10:00-19:00 / αρχικός προγραμματισμός με ηλ. ακτινοβολία)

Πετρο βάμβακας	EC5 μέση πλαί		EC5 από πάνω		VCM από πάνω	
	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.
Μέγιστο	35,267%	0,462%	32,553%	0,498%	63,170%	0,456%
Ελάχιστο	33,650%	1,855%	31,267%	1,533%	61,614%	1,432%
Μέση τιμή	34,731%	0,756%	32,096%	0,740%	62,622%	0,517%

Περλίτης	EC5 μέση πλάι		EC5 από πάνω		VCM μέση πλάι	
	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.
Μέγιστο	48,235%	0,718%	39,280%	0,557%	50,120%	2,178%
Ελάχιστο	45,360%	0,652%	38,290%	0,635%	45,752%	1,674%
Μέση τιμή	46,618%	0,606%	38,849%	0,609%	48,380%	2,152%

Πίνακας 11 Πιθανές τιμές ορίων προγραμματισμού με αισθητήρες υγρασίας υποστρώματος, (10:00-19:00 / εναλλακτικός προγραμματισμός με ηλ. ακτινοβολία)

Πετρο βάμβακας	EC5 μέση πλάι		EC5 από πάνω		VCM από πάνω	
	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.
Μέγιστο	36,118%	0,369%	33,646%	0,243%	62,684%	0,558%
Ελάχιστο	32,206%	1,002%	30,748%	0,624%	60,644%	1,237%
Μέση τιμή	34,936%	0,934%	32,665%	0,504%	61,987%	0,522%
Περλίτης	EC5 μέση πλάι		EC5 από πάνω		VCM μέση πλάι	
	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.	M.O.	Τυπ. Απ.
Μέγιστο	48,163%	1,310%	40,504%	1,064%	56,704%	2,372%
Ελάχιστο	45,607%	0,314%	39,082%	1,183%	51,046%	0,988%
Μέση τιμή	46,665%	0,688%	39,830%	1,083%	54,328%	2,071%

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 10) φαίνεται ότι στην πρώτη προσέγγιση άρδευσης με ηλιακή ακτινοβολία η διαφορά μεταξύ ορίων ήταν σε όλες τις περιπτώσεις στα επίπεδα του 2% (εκτός από την μέτρηση με VCM από το πλάι σε περλίτη που ήταν στο 4%). Επομένως, επειδή οι διαφορές αυτές είναι στα όρια της ακρίβειας των αισθητήρων δεν θα μπορούσε κάποιος με ασφάλεια (και με δεδομένο το ζήτημα με την χωρική ανομοιομορφία) να βασιστεί στις μετρήσεις αυτές για να έχει παρόμοιο αποτέλεσμα (σε επίπεδο εδαφικής υγρασίας). Στην εναλλακτική άρδευση (Πίνακας 11) αν και τα όρια διευρύνονται το πρόβλημα που αναφέρθηκε γενικά παραμένει.

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν σχετικά με τους αισθητήρες είναι τα ακόλουθα:

- τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων (όγκος δείγματος, τύπος ακίδων, έκταση επιφάνειας επαφής με υπόστρωμα) παίζουν σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των μετρήσεων και την μείωση των διαφορών από των μετρήσεων από σημείο σε σημείο,
- η ακριβής τήρηση των προδιαγραφών εγκατάστασης είναι απολύτως απαραίτητη ώστε να λειτουργήσει σύμφωνα με τον αναμενόμενο τρόπο το υπόστρωμα (η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί εάν αναζητηθούν

συστηματικά κατάλληλες αντιπροσωπευτικές θέσεις τοποθέτησης και λαμβάνονται μετρήσεις μόνο από αυτές),

- η ειδική βαθμονόμηση μειώνει σε κάποιο βαθμό την ανομοιομορφία των μετρήσεων,
- η τοποθέτηση σε προσανατολισμό και ύψος που δίνει μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ αρδευτικών γεγονότων θα μπορούσε να βοηθήσει στη χρήση τέτοιων αισθητήρων για προσδιορισμό της δόσης άρδευσης, σε κάθε περίπτωση όμως πρέπει να επιζητείται μεταβολή της υγρασίας μεταξύ των αρδευτικών γεγονότων αρκετά μεγάλη ώστε να μην υπάρχουν προβλήματα από τα όρια ακρίβειας των αισθητήρων,
- η ύπαρξη τυπικών μοτίβων από διάφορους τύπους αισθητήρων αποτελεί θετική ένδειξη σχετικά με τη χρήση τους στο πλαίσιο διαχείρισης της άρδευσης κυρίως όσο αφορά συναγερμούς, νυχτερινές αρδεύσεις, πρώτη και άρδευση στη διάρκεια της ημέρας.
- η χρήση αισθητήρα υγρασίας υποστρώματος είναι πολύτιμη μια και μπορεί να:
 - δώσει πληροφορία σχετικά με συναγερμούς όταν η υγρασία πέσει πολύ χαμηλά
 - να αυτοματοποιήσει το βραδινό πότισμα
 - να καθορίσει αυτόματα το χρόνο λειτουργίας της αντλίας (δόση).

Όσο αφορά την αξιολόγηση της άρδευσης είναι φανερό ότι ο προγραμματισμός με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία διατηρεί το υπόστρωμα πιο κοντά στην υδατοικανότητα φυτοδοχείου, δαπανώντας παρόμοιες (εώς και λίγο μικρότερες) ποσότητες νερού με τον χρονικό προγραμματισμό. Σε κάθε περίπτωση τις ηλιόλουστες ημέρες πρέπει η πρώτη άρδευση να γίνεται σε διάστημα λιγότερο από 2 ώρες από την ανατολή του ηλίου (ώστε να μην έχουμε μεγάλη νυχτερινή πτώση της υγρασίας στο υπόστρωμα και αντίστοιχη αύξηση της EC). Ακόμη τις ηλιόλουστες ημέρες συνίστανται συχνότερες αρδεύσεις μικρότερου όγκου ώστε να αποφεύγονται μεγάλες διακυμάνσεις της EC.

Μελλοντική έρευνα

Ενδιαφέρον θα είχε να αξιολογηθούν σε επίπεδο παραγωγής και αποτελεσματικότητας χρήσης νερού (για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου) διάφορες εναλλακτικές σχετικά με την χρήση αισθητήρων παραμέτρων στο υπόστρωμα για διαχείριση της άρδευσης. Για παράδειγμα θα μπορούσαν να αξιολογηθούν ταυτόχρονα (σε ένα υπόστρωμα) οι ακόλουθες προσεγγίσεις:

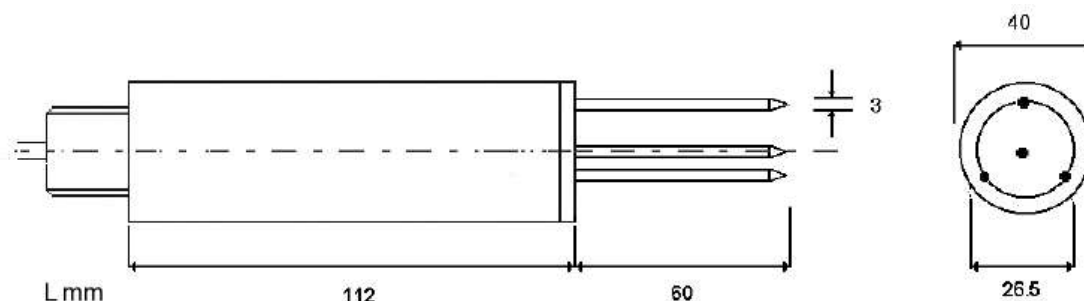
1. διαχείριση άρδευσης με ολοκλήρωση ηλιακής ακτινοβολίας μόνο,

2. διαχείριση άρδευσης με δεδομένα απορροής μόνο (βροχόμετρο),
3. διαχείριση άρδευσης με δεδομένα υγρασίας υποστρώματος μόνο,
4. διαχείριση άρδευσης με συνδυασμό ολοκλήρωσης ηλιακής ακτινοβολίας και δεδομένα απορροής,
5. διαχείριση άρδευσης με συνδυασμό ολοκλήρωσης ηλιακής ακτινοβολίας και δεδομένα υγρασίας υποστρώματος,
6. διαχείριση άρδευσης με συνδυασμό ολοκλήρωσης ηλιακής ακτινοβολίας, δεδομένα υγρασίας υποστρώματος και απορροής.

Χρήση και διαδικασίες βαθμονόμησης αισθητήρων

ΔT-ThetaProbe

Ο αισθητήρας ML-2 ThetaProbe (Delta T devices, UK) είναι ένα όργανο μέτρησης διαθλασιμετρίας ποσότητας (τεχνολογίας Amplitude Domain Reflectometry (ADR)) που χρησιμοποιείται ευρέως για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας (Kargas και Kerkides, 2008). Ο ML-2 ThetaProbe χαρακτηρίζεται ως αξιόλογος αισθητήρας για χρήση σε φυτοδοχεία μικρού όγκου όπως συνήθως συμβαίνει στα παραγωγικά θερμοκήπια (Pardossi κ.α., 2009).



Εικόνα 88 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ThetaProbe

Ο αισθητήρας μετρά την διηλεκτρική σταθερά, σε δείγμα όγκου περίπου 75cm^3 (Εικόνα 88, σχήματος κυλινδρικού με διάμετρο 4cm και ύψος 6cm γύρω από την κεντρική ακίδα), η δε σχέση του σήματος του αισθητήρα (mV ή V) και της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής χωρητικότητας μοντελοποιείται είτε μέσω πολυώνυμου 3^{ου} βαθμού είτε απλής γραμμικής σχέσης (ΔΤ, 1999):

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3 (R^2 = 0,998)$$

$$\sqrt{\varepsilon} = 1,1 + 4,44V (R^2 = 0,99)$$

**Εξίσωση 26 Σχέση διηλεκτρικής
αγωγιμότητας και σήματος σε
αισθητήρα ThetaProbe**

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή (ΔΤ, 1999) η διαφορά των δύο μοντέλων δεν είναι μεγάλη για υγρασίες έως 50% ν/ν. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την ομάδα που το ανέπτυξε (Tor κ.α., 1980), το πολυωνυμικό μοντέλο 3^{ου} βαθμού έχει και αυτό μειωμένη ακρίβεια για υγρασίες αρκετά μεγαλύτερες από 50%.

Ακόμη σύμφωνα με σειρά εργασιών που επικαλείται η ΔΤ (1999) υπάρχει μια απλή γραμμική σχέση μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής χωρητικότητας και της περιεχόμενης στο υπόστρωμα υγρασίας:

$$\sqrt{\varepsilon} = a_0 + a_1\theta$$

**Εξίσωση 27 Απλή σχέση
διηλεκτρικής αγωγιμότητας και
υγρασίας υποστρώματος σε
αισθητήρα ThetaProbe**

Συνδυάζοντας τις δύο αυτές εξισώσεις η ΔΤ (1999) προτείνει ένα απλό πρωτόκολλο βαθμονόμησης του αισθητήρα με δύο σημεία υγρασίας (τελείως ξηρό και τυχαία υγρασία). Σύμφωνα με την ΔΤ (1999) η χρήση των γενικών μοντέλων για mineral organic εδάφη με τα οποία είναι εξ' αρχής εφοδιασμένο το σύστημα μέτρησης δίνει ακρίβεια της τάξης του $\pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0-70°C) ενώ η βαθμονόμηση για το κάθε συγκεκριμένο υπόστρωμα μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια έως και τα επίπεδα του $\pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (0-40°C). Το πλήρες εύρος μέτρησης του αισθητήρα είναι από 0,0 έως $1,0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Η βαθμονόμηση αφορούσε δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υποστρώματα:

- πετροβάμβακας Grodan Expert και
- περλίτης ISOCON Perloflor Hydro 1

Για μεγαλύτερη σιγουριά στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 20 ζεύγη τιμών υγρασίας – σήματος ώστε να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι τιμές των συντελεστών a_0 και a_1 και να πολυωνυμική μοντελοποίηση (Kargas και Kerkides, 2009). Ακόμη επειδή στον πετροβάμβακα συχνά παρατηρούνται υγρασίες αρκετά πάνω από 50%, δοκιμάστηκαν και άλλα εμπειρικά μοντέλα ώστε να βρεθεί αυτό που έχει καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα. Για τον προσδιορισμό των συντελεστών των μοντέλων εφαρμόστηκε γραμμική και μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης με χρήση του πακέτου Origin (Microcal Software Inc., Northampton, USA).

Grodan Expert

Οι συντελεστές α_0 και α_1 υπολογίστηκαν ίσοι με 1,13925 και 10,0011 αντίστοιχα ($R^2=0,91$ για την γραμμική και $R^2=0,98$ για την πολυωνυμική). Επομένως οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$\theta = \frac{(1,1 + 4,4V) - 1,14}{10}$$

$$\theta = \frac{(1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3) - 1,14}{10}$$

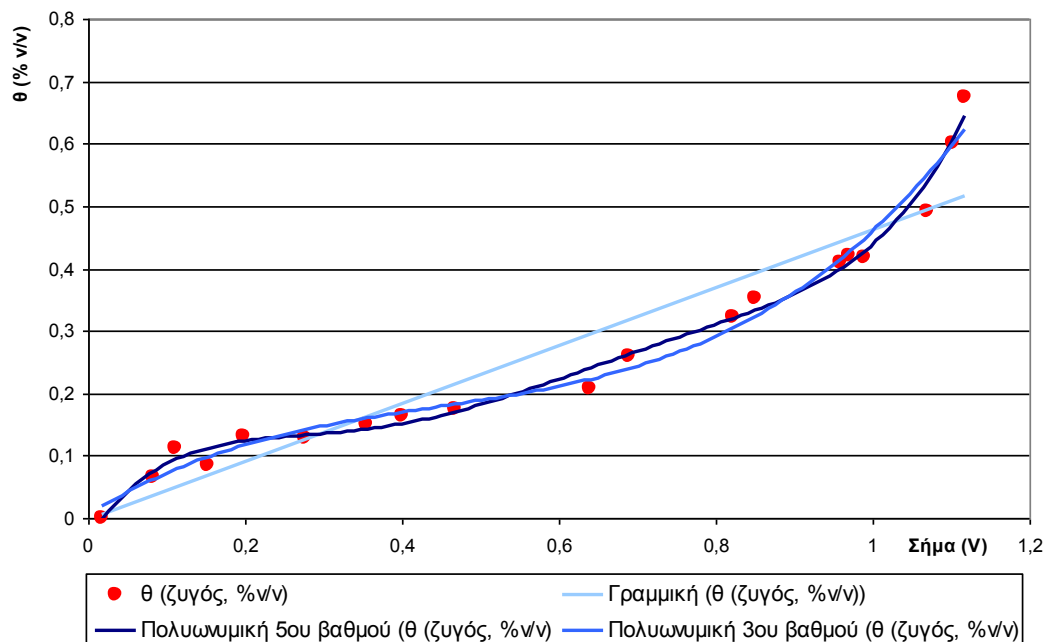
Εξίσωση 28 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe για Grodan Expert

Ακόμη βρέθηκε ότι η πολυωνυμική παρεμβολή 5^{ου} βαθμού δίνει R^2 ίσο με 0,996 και έχει καλύτερη προσαρμογή σε υγρασίες αρκετά μεγαλύτερες του 50%:

$$\theta = 6,5165V^5 - 18,256V^4 + 19,018V^3 - 8,7161V^2 + 1,9106V - 0,035$$

Εξίσωση 29 Σχέση 5^{ου} βαθμού υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe για Grodan Expert

Το σήμα (V) σε όλες τις εξισώσεις εισάγεται σε V και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται σε % v/v. Στην Εικόνα 89 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα και οι παρεμβολές.



Εικόνα 89 Πειραματικά ζεύγη τιμών και παρεμβολές (γραμμική, πολυωνυμική 3^{ου} και πολυωνυμική 5^{ου} βαθμού για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με ML2 ThetaProbe σε Grodan Expert

ISOCON Perloflor Hydro 1

Οι συντελεστές α_0 και α_1 υπολογίστηκαν ίσοι με 0,64365 και 8,23267 αντίστοιχα ($R^2=0,93$ για την γραμμική και $R^2=0,96$ για την πολυωνυμική). Επομένως οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

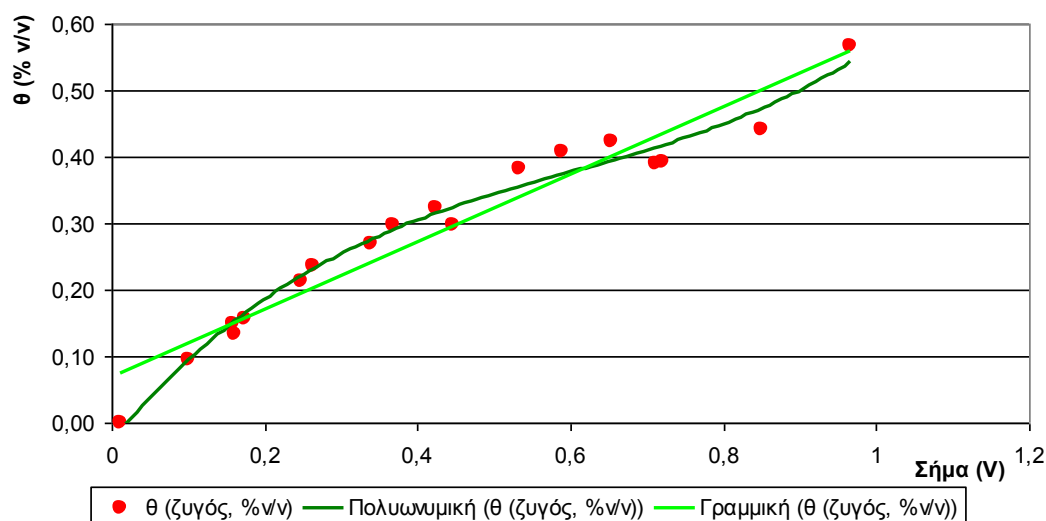
$$\theta = \frac{(1,1 + 4,4V) - 0,64}{8,23}$$

$$\theta = \frac{(1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3) - 0,64}{8,23}$$

**Εξίσωση 30 Σχέσεις υγρασίας και
σήματος σε αισθητήρα ThetaProbe
για Isocon Perloflor**

Το σήμα (V) σε όλες τις εξισώσεις εισάγεται σε V και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται σε (% v/v). Για την περίπτωση του περλίτη δεν υπήρχε λόγος να αναζητηθεί κάποιο περισσότερο πολύπλοκο πολυώνυμο με σκοπό τον υπολογισμό τιμών θ πολύ μεγαλύτερων του 50% μια και δεν είναι συνηθισμένες τέτοιες τιμές στο υπόστρωμα αυτό.

Στην Εικόνα 90 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα και οι παρεμβολές.

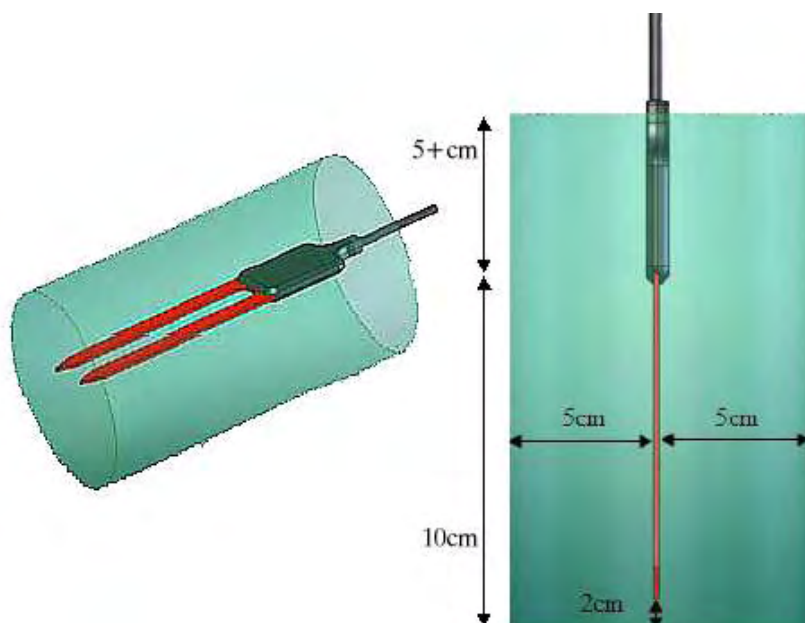


Εικόνα 90 Πειραματικά ζεύγη τιμών και παρεμβολές (γραμμική και πολυωνυμική 3^{ου} βαθμού για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με ML2 ThetaProbe σε Isocon Perloflor Hydro 1

Decagon 10HS

Ο αισθητήρας 10HS (Decagon devices, USA) είναι ένα όργανο μέτρησης διηλεκτρικής μέτρησης (τεχνολογίας Frequency Domain (FD) και ειδικότερα Frequency Domain Reflectometry (FDR)) που χρησιμοποιείται ευρέως για την μέτρηση της περιεχομένου υγρασίας σε εδάφη (Decagon Devices, 2009). Ο όγκος

μέτρησης του οργάνου είναι αρκετά μεγάλος, της τάξης των 1300 cm^3 (Cobos, 2008α).



Εικόνα 91 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και περιοχή δείγματος του 10HS (Cobos, 2008α)

Εξαιτίας ακριβώς του μεγάλου όγκου της περιοχής δείγματος ο κατασκευαστής δεν προτείνει τον αισθητήρα αυτό για υποστρώματα υδροπονίας ή μικρά δοχεία ή γενικά όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι μεγάλοι όγκοι υποστρώματος (Decagon Devices, 2009). Από την άλλη ο αισθητήρας έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε υποστρώματα όπου η ομοιογένεια αποτελεί πρόβλημα.

Σύμφωνα με την Decagon (2009) και τον Cobos (2010) η χρήση των γενικών μοντέλων για mineral organic εδάφη με τα οποία είναι εξ'αρχής εφοδιασμένο το σύστημα μέτρησης (πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού) δίνει ακρίβεια της τάξης του $\pm 0,03$ με $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ για εδάφη και $\pm 0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ για υποστρώματα. Η βαθμονόμηση για το κάθε συγκεκριμένο υπόστρωμα μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια έως και τα επίπεδα του $\pm 0,01$ με $\pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Η βαθμονόμηση αφορούσε δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υποστρώματα:

- πετροβάμβακας Grodan Expert και
- περλίτης ISOCON Perloflor Hydro 1

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του οργάνου (Decagon Devices, 2009) το εύρος μετρήσεων υγρασίας είναι από $0-0,57 \text{ m}^3/\text{m}^3$ γεγονός που σημαίνει ότι στην περίπτωση του πετροβάμβακα όπου οι υγρασίες σε συνθήκες υδροπονίας είναι σε αυτά και έως και 10-20% μεγαλύτερα επίπεδα υπάρχει θέμα σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης του αισθητήρα.

Ακολουθώντας τις οδηγίες βαθμονόμησης του κατασκευαστή (Cobos, 2010) χρησιμοποιήθηκαν 6 επίπεδα υγρασίας για την βαθμονόμηση (με 2 επαναλήψεις για το κάθε ένα από αυτά) και ανάλυση γραμμικής και μη-γραμμικής παλινδρόμησης για την εκτίμηση του μοντέλου. Η ανάλυση έγινε με χρήση του πακέτου Origin (Microcal Software Inc., Northampton, USA). Σημειώνεται ότι στην περίπτωση του 10HS, από τον αισθητήρα καταγράφονται στις ειδικές συσκευές του κατασκευαστή (π.χ. Decagon em50) raw units και όχι mV. Ο αισθητήρας σε κάθε περίπτωση μπορεί να συνδεθεί και με καταγραφικά άλλων κατασκευαστών όπου καταγράφονται κατευθείαν mV. Η σχέση μετατροπής mV σε raw units βρέθηκε να είναι η: Σήμα σε raw units = 1,3686 Σήμα σε mV - 0,2379 ($R^2 = 1$). Η σχέση αυτή ισχύει μόνο εάν η διέγερση του αισθητήρα γίνει με τάση 3-15V (Decagon Devices, 2009).

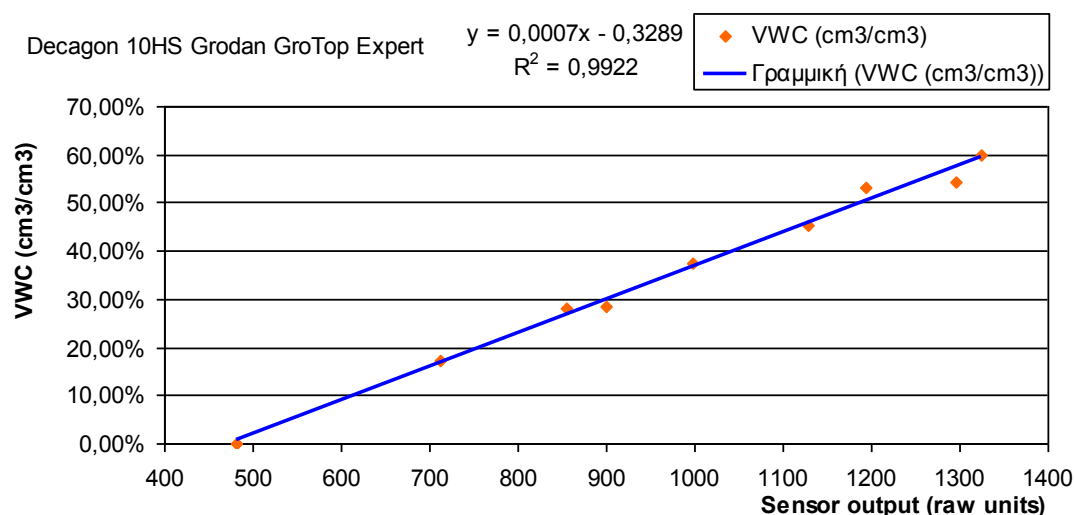
Grodan Expert

Οι συντελεστές του γραμμικού μοντέλου βρέθηκαν ίσοι με 0,0007 και -0,3289 αντίστοιχα ($R^2 = 0,99$). Για το λόγο αυτό κρίθηκε ότι δεν είναι πρακτική η χρήση πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού. Επομένως η εξίσωση έχει τη μορφή:

$$\theta = 0,0007RU - 0,3289$$

**Εξίσωση 31 Σχέσεις υγρασίας και
σήματος σε αισθητήρα 10HS για
Grodan Expert**

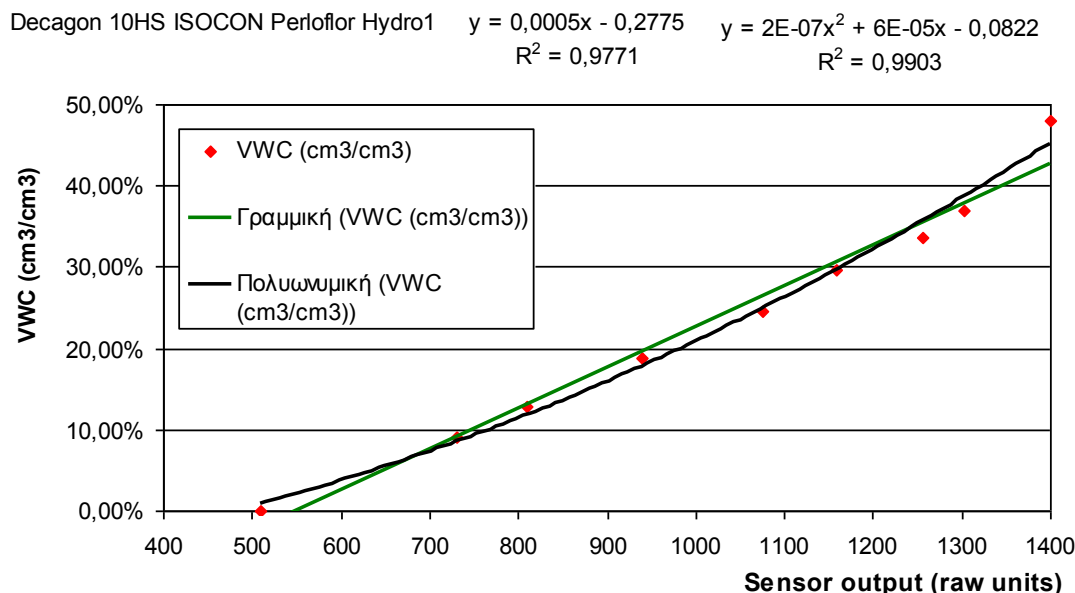
Το σήμα εισάγεται σε raw units και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται σε % v/v.



Εικόνα 92 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με 10HS σε Grodan Expert

ISOCON Perloflor Hydro 1

Οι συντελεστές (R^2) για το γραμμικό και το πολυωνυμικό (2^{ου} βαθμού) μοντέλο βρέθηκαν ίσοι με 0,98 και 0,99 αντίστοιχα.



Εικόνα 93 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με 10HS σε Isocon Perloflor Hydro 1

Οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$\theta = 0,0005 \cdot RU - 0,2775$$

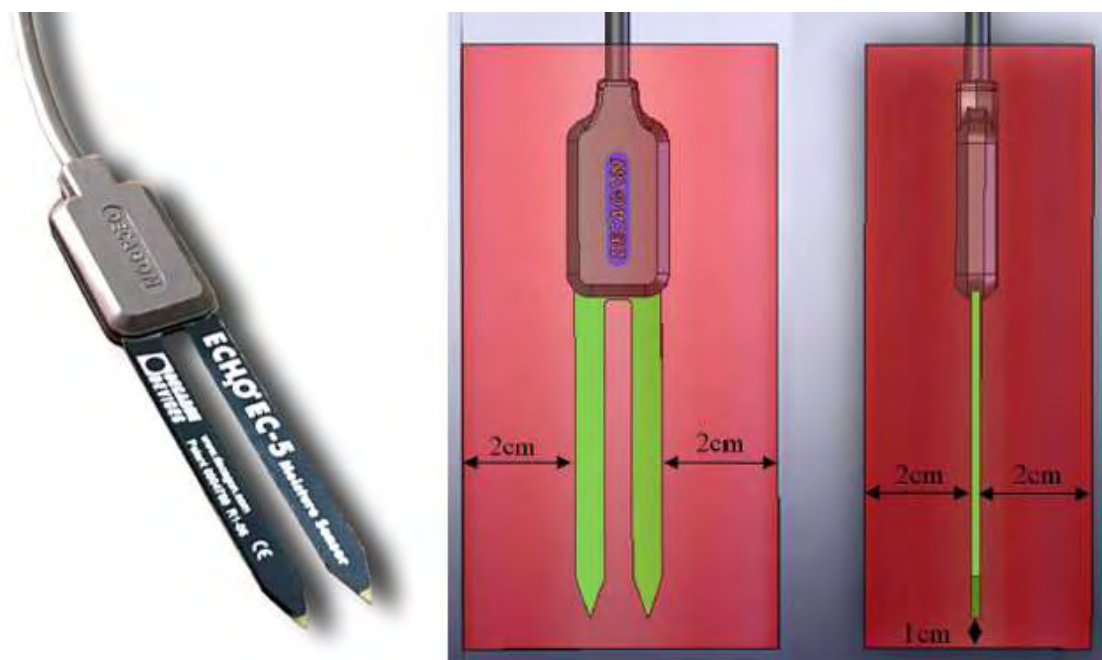
$$\theta = 2 \cdot 10^{-7} \cdot RU^2 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot RU - 0,0822$$

Εξίσωση 32 Σχέσεις υγρασίας και
σήματος σε αισθητήρα 10HS για
Isocon Perloflor

Το σήμα εισάγεται σε raw units και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται σε % v/v.

Decagon EC5

Ο αισθητήρας EC5 (Decagon devices, USA) είναι ένα όργανο μέτρησης διηλεκτρικής μέτρησης (τεχνολογίας Frequency Domain (FD) και ειδικότερα Frequency Domain Reflectometry (FDR)) που χρησιμοποιείται ευρέως για την μέτρηση της περιεχομένου υγρασίας σε εδάφη (Decagon Devices, 2010). Είναι της ίδιας τεχνολογίας με τον 10HS αλλά το μικρότερο μήκος ακίδων του τον κάνει ιδανικό για χρήση σε υποστρώματα σε σάκους ή φυτοδοχεία, των οποίων ο όγκος είναι περιορισμένος. Ο όγκος μέτρησης του οργάνου είναι αρκετά μεγάλος, της τάξης των 181 cm³ (Cobos, 2008β) (Εικόνα 94).



Εικόνα 94 Ο αισθητήρας EC5 και η σχετική περιοχή δείγματος (Cobos, 2008β)

Σύμφωνα με την Decagon (2009) η χρήση των γενικών μοντέλων για mineral organic εδάφη με τα οποία είναι εξ'αρχής εφοδιασμένο το σύστημα μέτρησης (πολυώνυμα 2^{ου} βαθμού) δίνει ακρίβεια της τάξης του $\pm 0,03$ με $\pm 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ για εδάφη και υποστρώματα (για EC 3-14 dS/m όσο αφορά το έδαφος και 0,5-8 dS/m όσο αφορά τον πετροβάμβακα). Η βαθμονόμηση για το κάθε συγκεκριμένο υπόστρωμα μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια έως και τα επίπεδα του $\pm 0,01$ με $\pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Η ανάλυση των μετρήσεων είναι 0,1 VWC% για ανόργανα εδάφη και 0,25% VWC για πετροβάμβακα. Το εύρος μέτρησης είναι από 0-100% VWC.

Η Decagon (2011) παρέχει μοντέλα για μετατροπή των ενδείξεων του αισθητήρα (mV ή raw units – RU, βλέπε 10HS) σε υγρασία υποστρώματος για πετροβάμβακα και περλίτη⁴⁵:

Πετροβάμβακας (γενική σχέση):

$$\theta = 6,28 \cdot 10^{-7} \cdot RU^2 + 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot RU - 0,183$$

$$\theta = 2,63 \cdot 10^{-6} \cdot mV^2 - 5,07 \cdot 10^{-4} \cdot mV - 0,0394$$

**Εξίσωση 33 Σχέσεις υγρασίας και
σήματος σε αισθητήρα EC5 για
πετροβάμβακα**

⁴⁵ Προσοχή: Οι σχέσεις αυτές ισχύουν μόνο για εάν τη τάση παροχής ρεύματος στον αισθητήρα είναι (excitation) ίση με 2500mV

Περλίτης (γενική σχέση):

$$\theta = -1,30 \cdot 10^{-7} \cdot RU^2 + 8,81 \cdot 10^{-4} \cdot RU - 0,314$$

$$\theta = -2,36 \cdot 10^{-7} \cdot mV^2 + 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot mV - 0,207$$

**Εξίσωση 34 Σχέσεις υγρασίας και
σήματος σε αισθητήρα EC5 για
περλίτη**

Ακόμη έγινε βαθμονόμηση που αφορούσε ειδικά δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υποστρώματα:

- πετροβάμβακας Grodan Expert και
- περλίτης ISOCON Perloflor Hydro 1

Ακολουθώντας τις οδηγίες βαθμονόμησης του κατασκευαστή (Cobos, 2010) χρησιμοποιήθηκαν 6 επίπεδα υγρασίας για την βαθμονόμηση (με 2 επαναλήψεις για το κάθε ένα από αυτά) και ανάλυση γραμμικής και μη-γραμμικής παλινδρόμησης για την εκτίμηση του μοντέλου.

Ο αισθητήρας σε κάθε περίπτωση μπορεί να συνδεθεί και με καταγραφικά άλλων κατασκευαστών όπου καταγράφονται κατευθείαν mV. Η σχέση μετατροπής mV σε raw units βρέθηκε να είναι η: Σήμα σε raw units (RU) = 1,5398 Σήμα σε mV + 49,042 ($R^2 = 0,98$). Η σχέση αυτή ισχύει μόνο εάν η διέγερση του αισθητήρα γίνει με τάση 3V (Decagon Devices, 2010).

Η στατιστική ανάλυση έγινε με χρήση του πακέτου Origin (Microcal Software Inc., Northampton, USA).

Grodan Expert

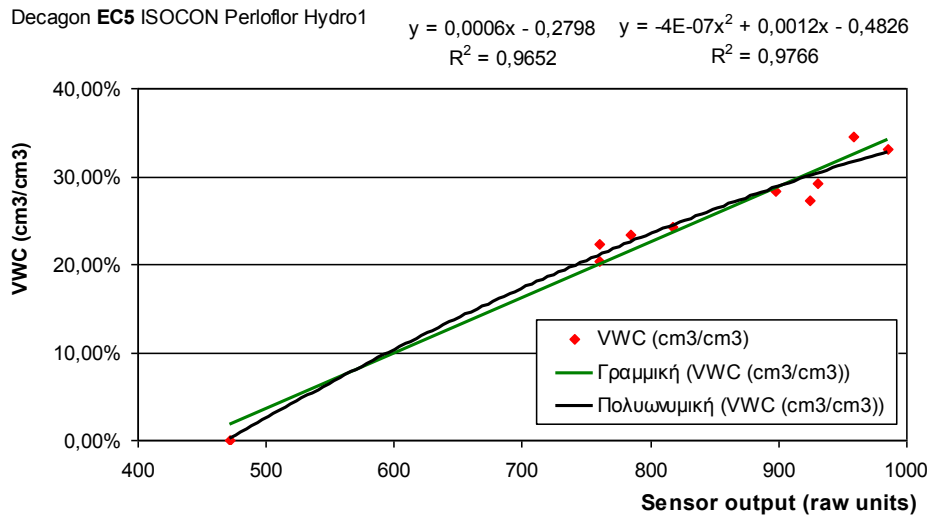
Οι προσαρμογή του γραμμικού μοντέλου και του πολυωνυμικού ($2^{ου}$ βαθμού) μοντέλων ήταν καλή, συντελεστές $R^2 = 0,9652$ και $0,9766$ αντίστοιχα. Οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$\theta = 0,0006RU - 0,2798$$

$$\theta = -4 \cdot 10^{-7} RU^2 + 0,0012 \cdot RU - 0,4826$$

**Εξίσωση 35 Σχέσεις υγρασίας και
σήματος σε αισθητήρα EC5 για
Grodan Expert**

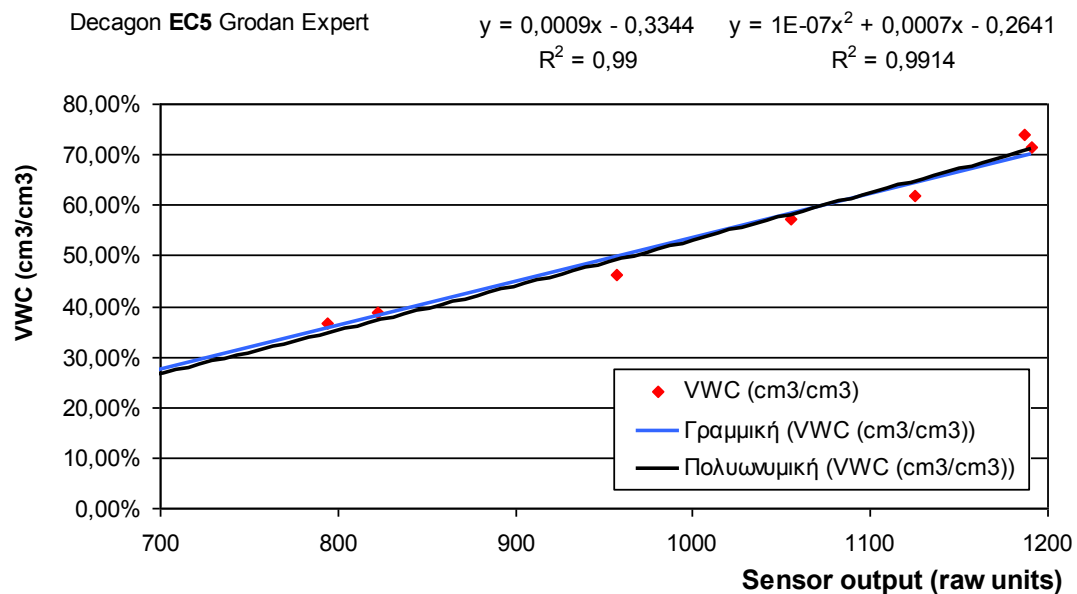
Το σήμα εισάγεται σε raw units και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται σε % v/v.



Εικόνα 95 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με EC5 σε Grodan Expert

ISOCON Perloflor Hydro 1

Οι συντελεστές (R^2) για το γραμμικό και το πολυωνυμικό (2^{ου} βαθμού) μοντέλο βρέθηκαν ίσοι με 0,99 και 0,991 αντίστοιχα.



Εικόνα 96 Πειραματικά ζεύγη τιμών και γραμμική παρεμβολή (για μέτρηση υγρασίας (θ %v/v) με 10HS σε Isocon Perloflor Hydro 1

Οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$\theta = 0,0009 \cdot RU - 0,3344$$

$$\theta = 10^{-7} \cdot RU^2 + 0,0007 \cdot RU - 0,2641$$

Εξίσωση 36 Σχέσεις υγρασίας και σήματος σε αισθητήρα EC5 για Isocon Perloflor

Το σήμα εισάγεται σε raw units και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται σε % v/v.

Grodan WCM-Control

Το Grodan WCM-Control είναι σχεδιασμένο και βαθμονομημένο για μετρήσεις VWC (% v/v), EC (dS/m) και T ($^{\circ}$ C) για τη σειρά προϊόντων της Grodan. Το Grodan Expert που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη ορίζεται ως τύπος 2 (έχει αυτό τον κωδικό) στο όργανο.

Χρήση για διαχείριση άρδευσης πετροβάμβακα Grodan

Σε προσωπική επικοινωνία με τον αντιπρόσωπο (Δρίμτσιας, 2011) της Grodan στην Ελλάδα (DKG group, <http://www.dkggroup.com/>) μεταφέρθηκαν οι ακόλουθες οδηγίες για αξιοποίηση του WCM για τη διαχείριση άρδευσης. Καταρχήν για να λειτουργήσουν υδρολογικά τα υποστρώματα όπως αναμένεται πρέπει να εγκατασταθούν σωστά. Η σύσταση προς τους παραγωγούς (σημειώνεται ότι πάντα στην εγκατάσταση παρευρίσκεται άνθρωπος της εταιρείας) είναι:

- 1) Σωστή τοποθέτηση υποστρώματος (τα υποστρώματα έχουν ειδική διαστρωμάτωση ώστε να κρατούν παρόμοιο ποσοστό υγρασίας σε όλο το ύψος τους, για αυτό το λόγο έχουν ένδειξη σχετικά με πια πλευρά πάει πάνω και πια κάτω), φύτευση και εγκατάσταση αρδευτικού.
- 2) Άρδευση με σκοπό τον κορεσμό (να γεμίσει με νερό το υπόστρωμα)
- 3) Μετά από 48 ώρες, τομές απορροής όσο το δυνατόν χαμηλότερα, πρακτικά στη βάση του σάκου.

Όσο αφορά το WCM-Control οι συστάσεις προς τους παραγωγούς ώστε να έχουν βελτιωμένο οικονομικό αποτέλεσμα (αυξημένη παραγωγή, λιγότερα λιπάσματα) αλλά και μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο (μικρότερη κατανάλωση νερού) είναι οι ακόλουθες:

- 1) να μετρούν κάθε ημέρα ή το λιγότερο 3 φορές ανά εβδομάδα
- 2) οι μετρήσεις να γίνονται την ίδια ώρα και καλύτερα το πρωί πριν από το πρώτο πότισμα όταν αναμένεται σχετικά μεγάλη ανομοιομορφία μετρήσεων
- 3) να λαμβάνουν τουλάχιστον 15 μετρήσεις / στρέμμα σε σάκους που θεωρούν χαρακτηριστικούς και πάντα στους ίδιους (λαμβάνοντας υπόψη το μικροκλίμα, την ανάπτυξη των φυτών κοκ)
- 4) όλες οι ενδείξεις $\theta < 20\%$ και $> 80\%$ να μην λαμβάνονται υπόψη για υπολογισμό μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης αλλά σε κάθε περίπτωση να δημιουργούν υποψίες για ανομοιομορφία αρδευτικού (ή πρόβλημα σε συγκεκριμένους στάλακτες)

- 5) η τελική μέση τιμή και η απόκλιση χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της άρδευσης (στη διαδικασία συμμετέχουν και οι σύμβουλοι της εταιρείας), τυπικά για τομάτα συστήνουν το καλοκαίρι μέση τιμή 70-75% και τις άλλες εποχές 60-65% (τα επίπεδα υγρασίας στο υπόστρωμα προωθούν την βλαστική ή αναπαραγωγική διάθεση της καλλιέργειας), όσο αφορά την τυπική απόκλιση: 5% είναι καλή, 10% αποδεκτή, πάνω από 10% πρόβλημα (ομοιομορφία αρδευτικού, ανομοιομορφία τοποθέτησης ή ανάπτυξης φυτών, μικροκλίμα κοκ).

Εάν παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις τιμών αυτές ίσως να οφείλεται στο λανθασμένο χειρισμό του υποστρώματος στην αρχή π.χ. τομές απορροής πολύ νωρίς σε σχέση με αρχικό πότισμα κορεσμού και σε λάθος ύψος π.χ. σε 1cm από τη βάση με στόχο (παλιά σύσταση) τη δημιουργία "δεξαμενής" νερού στο υπόστρωμα. Αυτό είναι σημαντικό λάθος, καλείται κοινά "νεροκράτημα" αλλά έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο μέρος του ριζικού όγκου να γίνεται προς την περιοχή εκείνη "όλη η ρίζα πάει κάτω" με αποτέλεσμα την ανομοιογένεια υγρασίας στο υπόστρωμα, τον αυξημένο κίνδυνο υδατικής καταπόνησης σε περίπτωση αστοχίας του αρδευτικού κοκ.

Βαθμονόμηση για περλίτη ISOCON Hydro 1 ως προς υγρασία υποστρώματος

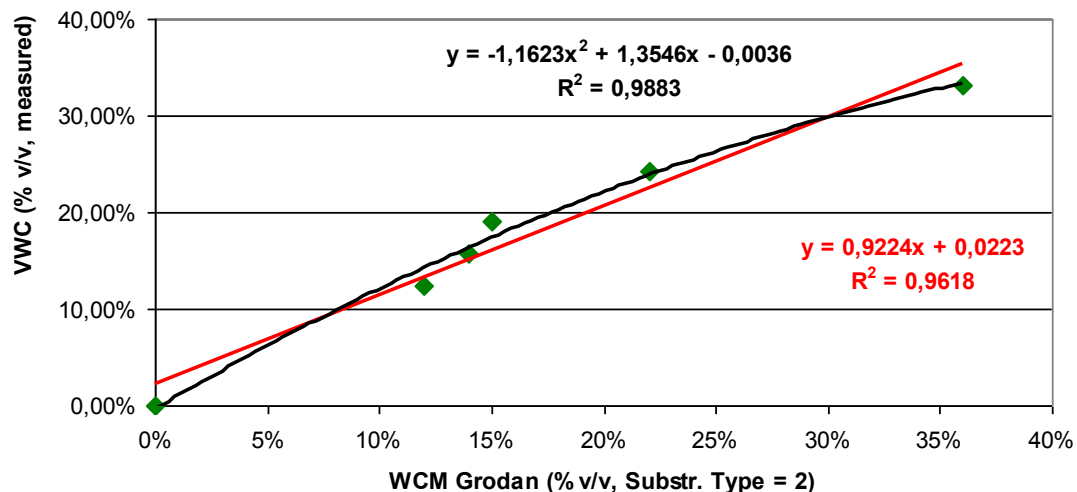
Με καθορισμένο τον τύπο ως 2 έγινε μία σειρά από μετρήσεις σε υπόστρωμα περλίτη και ο αντίστοιχος υπολογισμός της περιεχόμενης υγρασίας κατ'όγκο. Έγινε γραμμική ($R^2=0,96$) και πολυωνυμική ($R^2=0,99$) παρεμβολή και οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$\theta = 0,9224 \cdot WCM(Type2) + 0,0223$$

$$\theta = -1,1623 \cdot WCM(Type2)^2 + 1,3456 \cdot WCM(Type2) - 0,0036$$

**Εξίσωση 37 Σχέσεις
υγρασίας και σήματος
σε αισθητήρα WCM
για Isocon Perloflor**

Το σήμα (WCM(Type2)) εισάγεται σε (% v/v και το αποτέλεσμα (θ) δίνεται επίσης σε % v/v.



Εικόνα 97 Βαθμονόμηση WCM-Control Grodan για μέτρηση υγρασίας σε Isocon Perloflor Hydro 1

Βαθμονόμηση για περλίτη ISOCON Hydro 1 ως προς ηλεκτρική αγωγιμότητα

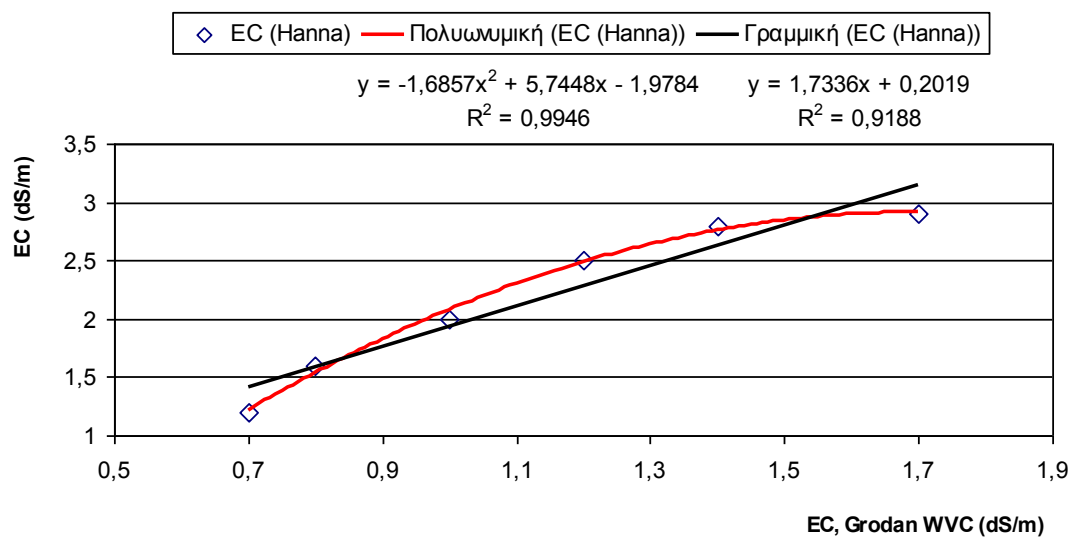
Συγκρίθηκε η αγωγιμότητα που μετρούσε το Grodan WCM με αυτή που μετρήθηκε σε διήθημα από το υπόστρωμα με αγωγιμόμετρο το οποίο είχε προηγουμένως βαθμονομηθεί με υγρά αναφοράς. Τα μετρούμενα υγρά είχαν θερμοκρασία 20°C. Βρέθηκε μία γραμμική ($R^2=0,91$) και μία πολυωνυμική ($R^2=0,99$) εξίσωση (Εικόνα 98). Οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$EC = 1,7336 \cdot EC(type2) + 0,2019$$

$$EC = -1,6857 \cdot EC(type2)^2 + 5,7448 \cdot EC(type2) - 1,9784$$

**Εξίσωση 38 Σχέσεις
ηλεκτρικής αγωγιμότητας
και σήματος σε αισθητήρα
WCM για Isocon Perloflor**

Το σήμα ($EC(Type2)$) δίνεται σε dSm^{-1} και η EC που προκύπτει είναι επίσης σε dSm^{-1} .



Εικόνα 98 Καμπύλες βαθμονόμησης για μέτρηση EC με Grodan WCM σε περλίτη

Κεφάλαιο 9 – Αυτόματος έλεγχος της άρδευσης μέσω μέτρησης παραμέτρων του εναέριου περιβάλλοντος και του ριζοστρώματος σε θερμοκήπια που εντάσσονται σε έργα πράσινου

Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή

Η χρήση θερμοκηπίων στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής τοπίου μετρά ήδη αρκετούς αιώνες (von de Muizenberg, 1980). Τα θερμοκήπια αποτελούν στοιχείο έργων πράσινου τόσο σε ιδιωτικό όσο και σε δημόσιο επίπεδο (Lemmon, 1962, von de Muizenberg, 1980, Clegg και Watkins, 1980).

Τον 16^ο μ.χ. αιώνα οι έμποροι και οι εξερευνητές αρχίζουν να μεταφέρουν εξωτικά φυτά που δεν ήταν εύκολο να επιζήσουν και να αναπτυχθούν στο ψυχρό κλίμα της Β. Ευρώπης. Για τη διατήρηση και τη μελέτη τους δημιουργήθηκαν ειδικοί Βοτανικοί κήποι αρχικά στην Ιταλία και μετά στην Ολλανδία και στην Αγγλία (αν και υπάρχουν ενδείξεις για την λειτουργία βοτανικών κήπων από τον 14^ο μ.χ. αιώνα). Στους περισσότερους από τους κήπους αυτούς υπήρχαν χώροι όπου προστατεύονταν τα φυτά από το κρύο. Ο αρχιτέκτονας Schickhardt (von de Muizenberg, 1980), ο οποίος επισκέφθηκε την Ιταλία το 1599-1600, περιγράφει έναν κήπο με πορτοκαλιές στην Φεράρα, μήκους 50m και πλάτους 13m που προστατεύονταν προς βορρά με ένα ψηλό τοίχο. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα ο κήπος καλύπτονταν με μία ξύλινη κατασκευή, η οποία είχε ανοίγματα κλεισμένα με ξύλινα παραπετάσματα προς νότο που άνοιγαν όταν ο καιρός ήταν καλός. Όταν έκανε πολύ κρύο το εσωτερικό θερμαίνονταν με φωτιές από κάρβουνο. Το 1600 ο γνωστός γεωπόνος Oliver de Serres έγραψε την πρώτη έκδοση του «Theatre d'Agriculture» όπου περιγράφει το κινητό ξύλινο υπόστεγο του Εκλέκτορα του Pfalz (Lemmon, 1962). Αυτό είχε μεγάλα ανοίγματα, που ανοιγόκλειναν και θερμαίνονταν με θερμάστρες. Προστατευόμενες καλλιέργειες με λαδόχαρτο ή ψάθες με σκοπό την πρωίμηση καρπών άρχισαν στην Ιαπωνία την περίοδο Keicho (1596-1614) στην πόλη Miho (Sadao, 1986). Ακόμα είναι γνωστό ότι την εποχή εκείνη οι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν θερμαινόμενα κτίσματα για την προστασία φυτών (Sadao, 1986).

Τον 17^ο αιώνα τα εξωτικά φυτά, εκτός από το βοτανικό ενδιαφέρον που παρουσίαζαν άρχισαν να χρησιμοποιούνται από την αριστοκρατία της Β. Ευρώπης και ως διακοσμητικά. Από τα καρποφόρα πολύ δημοφιλή ήταν τα εσπεριδοειδή. Τα υπόστεγα του προηγούμενου αιώνα έδωσαν τη θέση τους σε κτίρια, τα δε ανοίγματα

της νότιας πλευράς αντικαταστάθηκαν από παράθυρα (Lemmon, 1962). Παράθυρα με γυαλί -όχι βέβαια ενιαίο μια και τότε το μεγαλύτερο κομμάτι γυαλί είχε διαστάσεις 0,10x0,15m- τα οποία αποτελούνταν από φύλλα που άνοιγαν όπως τα κοινά παράθυρα ώστε να αερίζεται το εσωτερικό και ήταν εφοδιασμένα με παραθυρόφυλλα. Οι άλλες τρεις πλευρές ήταν τοίχοι κτισμένοι από πέτρες ή τούβλα και η οροφή ήταν αδιαφανής. Από τα μέσα του αιώνα αυτού υπάρχουν αναφορές για την ύπαρξη παρόμοιων κατασκευών σε όλη σχεδόν την Ευρωπαϊκή Ήπειρο (Τσιρογιάννης, 1996). Η θέρμανση θερμοκηπίων με κυκλοφορία ζεστού νερού εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Αγγλία το 1675 από τον Evelyn, όμως διάδοση του συστήματος σημειώθηκε μετά το 1730 (von de Muizenberg, 1980). Στη Γαλλία το 1688 στα υαλουργεία του Σαιν Γκομπαίν άρχισε η παραγωγή χυτού γυαλιού σε πλάκες. Το κόστος του όμως ήταν πολύ υψηλό. Η κύρια μέθοδος κατασκευής επίπεδου γυαλιού μέχρι και το μεγαλύτερο μέρος του 19^{ου} αιώνα ήταν αυτή με φυσητήρα και περιστροφή μέχρι τη στερεοποίηση του (Lemmon, 1962).

Τον 18^ο αιώνα, είχε αναγνωριστεί πλήρως η συμβολή του καλού φωτισμού στην υγιή ανάπτυξη των φυτών και άρχισε να υπολογίζεται η γωνία κλίσης του γυαλιού ώστε να εισέρχεται περισσότερο φως στο χώρο όπου βρίσκονταν τα φυτά. Τα παράθυρα της νότιας πλευράς μεγάλωσαν και άλλο και απέκτησαν κλίση φτάνοντας να γίνουν σχεδόν ενιαία διαφανής επιφάνεια μέχρι την κορυφή της στέγης. Για περισσότερο φως εμφανίστηκαν παράθυρα και στις πλαϊνές πλευρές καθώς και διάφανη αμφικλινής στέγη προς το τέλος του αιώνα, βέβαια σε όλες τις περιπτώσεις ο βόρειος τοίχος παρέμενε κτιστός (von de Muizenberg, 1980). Το μεγαλύτερο κομμάτι επίπεδου γυαλιού έφτασε τα 0,25x0,4m. Την εποχή εκείνη εισήχθηκε ακόμη από τους Ολλανδούς η χρήση της θερμοκουρτίνας για μείωση της ψύξης κατά τη διάρκεια της νύχτας καθώς και η κατασκευή διπλού διάφανου τοιχώματος στα παράθυρα, χρησιμοποιώντας το λαδόχαρτο ως δεύτερο κάλυμμα. Όσο αφορά το σκελετό του κτιρίου εκτός από το ξύλο, την πέτρα και το τούβλο χρησιμοποιήθηκε ο σίδηρος, όμως το κόστος του ήταν ακόμη μεγάλο (Lemmon, 1962). Το 1721 ο Liger παρουσίασε μια θερμοκλίνη με γυάλινες επιφάνειες σε όλες τις πλευρές. Αυτή ήταν ένας πρόγονος των θερμοκηπίων του 19^{ου} αιώνα (Clegg και Watkins, 1980). Το 1768 ο Miller σχεδιάζει μικρά ξύλινα φορητά πλαίσια με αμφικλινές ή τοξωτό σχήμα, καλυμμένα με ημιδιαφανές λαδόχαρτο. Είναι η πρώτη χρήση υλικού κάλυψης διαφορετικού και ελαφρύτερου από το γυαλί στην Ευρώπη.

Τον 19^ο αιώνα η βιομηχανοποίηση έδωσε ώθηση και στα θερμοκήπια. Στην προσπάθεια για περισσότερο φως αναπτύχθηκε το αμφικλινές θερμοκήπιο και κατασκευάστηκαν πολλαπλά θερμοκηπίων με κορφιάδες και υδρορροές (Lemmon, 1962). Ο τελευταίος τοίχος που είχε απομείνει -ο βορινός- έδωσε τη θέση του σε

άλλη μία γυάλινη επιφάνεια έτσι που το φως έμπαινε πια από όλες τις πλευρές. Στη σκεπή επικράτησε το αμφικλινές σχήμα. Νέες μέθοδοι κατασκευής υαλοπινάκων τους έκαναν φτηνότερους, το μέγεθος τους έφτασε τα 0,72X1,42m, ενώ το 1806 κατασκευάστηκε το πρώτο θερμοκήπιο με διπλές πλάκες γυαλιού. Με το τέλος του 19^{ου} αιώνα οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες είχαν επεκταθεί στη χειμερινή καλλιέργεια τροπικών φυτών, φοινίκων και ορχιδέας και ήταν καλά εδραιωμένες στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες του κόσμου (von de Muizenberg, 1980). Την εποχή εκείνη οι περισσότεροι βοτανικοί κήποι του κόσμου είχαν εγκαταστάσεις θερμοκηπίων για την έκθεση τροπικών φυτών (Εικόνα 99), τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελούσαν σημαντικά στοιχεία προβολής του κάθε κήπου (Hix, 1996).



Εικόνα 99 Το συγκρότημα θερμοκηπίων στο βοτανικό κήπο Cluj Napoca στη Ρουμανία

Η άρδευση στα θερμοκήπια βοτανικών κήπων

Τα θερμοκήπια των βοτανικών κήπων αποτελούν την περισσότερο συνηθισμένη χρήση θερμοκηπίου στο πλαίσιο μεγάλων έργων πράσινου (Εικόνα 100). Ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά τους μεταξύ των οποίων η διατήρηση στον ίδιο χώρο πολλών διαφορετικών ειδών φυτών (από τις σημαντικότερες διαφορές της αγροτικής χρήσης γης σε σχέση με τα έργα πράσινου) και η διαχείρισή τους από εξειδικευμένους επιστήμονες αυξάνουν το ενδιαφέρον μελέτης των μεθόδων ελέγχου της άρδευσης που εφαρμόζονται σε αυτά.



Εικόνα 100 Εσωτερικό θερμοκηπίου βοτανικού κήπου (Tallinn Botanic Garden)

Ακολουθώντας τις προόδους της επιστήμης τα θερμοκήπια των βοτανικών κήπων εφαρμόζουν όλες τις σύγχρονες μεθόδους διαχείρισης άρδευσης. Για να υπάρχει όμως σαφής σχετική πληροφορία επιλέχθηκε η διενέργεια σχετικής έρευνας με ερωτηματολόγιο που περιελάμβανε κλειστές και ανοικτές απαντήσεις.

Ερωτηματολόγιο

Στο πλαίσιο της μελέτης αναπτύχθηκε σχετικό ερωτηματολόγιο το οποίο αναρτήθηκε στη σχετική υπηρεσία της Google-Εγγραφα και στην συνέχεια προσκλήθηκαν, μέσω email, να απαντήσουν οι υπεύθυνοι από 352 βοτανικούς κήπους σε όλο τον κόσμο. Τα στοιχεία επαφής με τους βοτανικούς βρέθηκαν μέσω της βάσης δεδομένων της Botanic Gardens Conservation International (<http://www.bgci.org/>) καθώς και με ελεύθερη αναζήτηση δεδομένων στο διαδίκτυο.

Το ερωτηματολόγιο είχε τίτλο «Irrigation management in botanical garden greenhouses» και περιελάμβανε τις ακόλουθες ερωτήσεις (συμπληρώνονταν ξεχωριστά ερωτηματολόγια για κάθε τύπο θερμοκηπίου που υπήρχαν σε κάθε βοτανικό κήπο):

Botanical garden name:

Full name of the person that filled the form:

Position / Responsibilities:

email:

Do you have a greenhouse in your botanical garden?

- ☐ Yes
- ☐ No

Which is the use of the greenhouse?

- ☐ Plant exposition
- ☐ Nursery
- ☐ Other

Which are the substrates that you use in the greenhouse?

- ☐ Soil (all types and mixtures based on soil)
- ☐ Soilless culture substrates (all types)
- ☐ Other

How do you irrigate plants inside the greenhouse?

- ☐ Manually using a hose
- ☐ Using an irrigation system (sprinklers, emitters etc)

How do you control irrigation inside the greenhouse?

- ☐ Manually
- ☐ Automatically

How do you setup irrigation schedules and manage irrigation?

- ☐ Empirically, using experience and on-site observations
- ☐ Using evapotranspiration calculations and adjustments based on experience and on-site observations
- ☐ Using sensor inputs (ambient air conditions, soil moisture measurements etc)
- ☐ The control system adjusts irrigation automatically using sensor inputs

Which kind of sensors do you use to make decisions regarding irrigation?

- ☐ None
- ☐ Tensiometer
- ☐ Water content sensor
- ☐ Leaf thermometer
- ☐ Porometer
- ☐ Substrate EC sensor
- ☐ Soil/Substrate temperature sensor
- ☐ Drainage or leaching water volume measurement device
- ☐ Drainage or leaching water EC sensor

☐ Radiation sensor (infrared thermometer, infrared camera, radiometer etc)

Other kind of sensors that you use?

Which kind of sensors does the automatic system uses in order to manage irrigation?

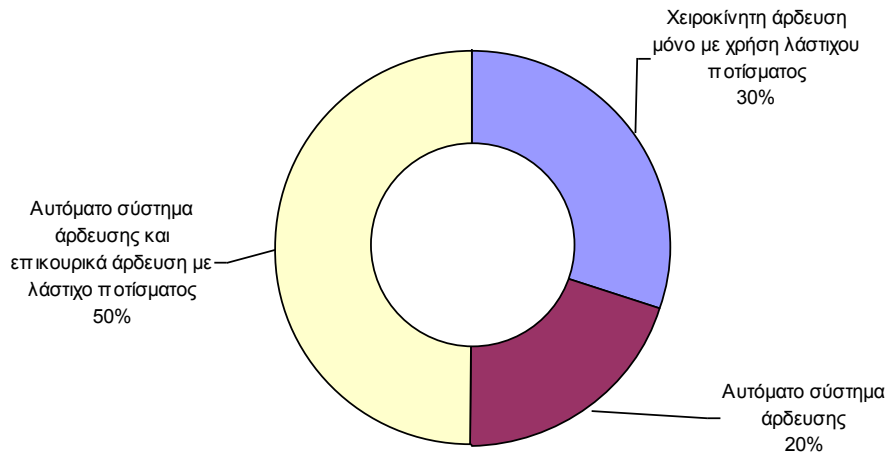
- ☐ None, it is a time control system
- ☐ Ambient climatic parameters sensors (T, RH, etc)
- ☐ Solar radiation sensors
- ☐ Leaf thermometers
- ☐ Radiation sensors (infrared thermometers, infrared cameras, radiometers etc)
- ☐ Soil/substrate water tension sensors
- ☐ Soil/substrate moisture content sensors
- ☐ Substrate EC sensors
- ☐ Soil/Substrate temperature sensors
- ☐ Drainage or leaching water volume measurement devices
- ☐ Drainage or leaching water EC sensors

Other kind of sensors that you use?

Other things that you want to specify regarding irrigation control in botanical garden greenhouse

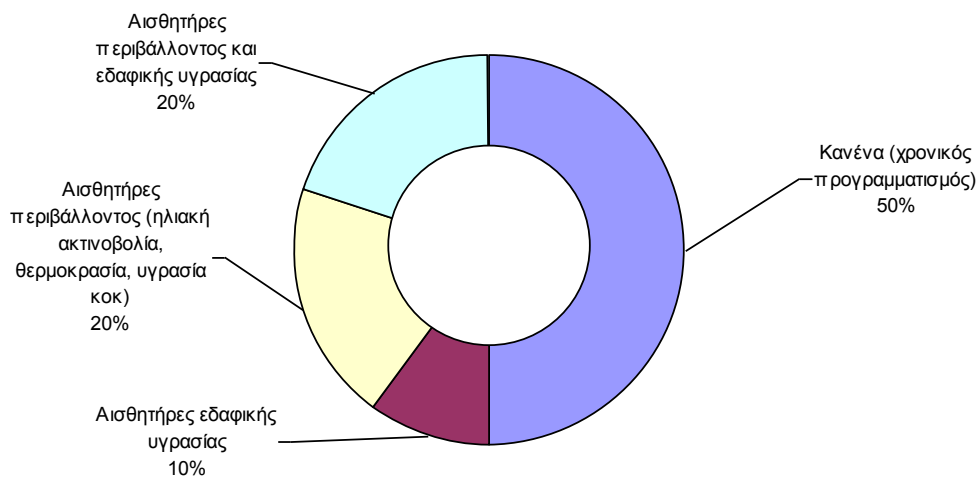
Αποτελέσματα – Συζήτηση - Συμπεράσματα

Συγκεντρώθηκαν 63 απαντήσεις στο ερωτηματολόγιο από πολλές χώρες (κυρίως της Βόρειας και Δυτικής Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής αλλά και από την Αυστραλία, το Ισραήλ, τη Μπελίζε και τη Χιλή. Όλοι οι βοτανικοί κήποι που απάντησαν είχαν θερμοκήπιο το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις (50%), προοριζόταν για φυτώριο, ενώ στο 40% για έκθεση φυτών.



Εικόνα 101 Άρδευση θερμοκηπίων σε βοτανικούς κήπους

Στην απόλυτη σχεδόν πλειοψηφία των θερμοκηπίων αυτών χρησιμοποιείται έδαφος με διάφορες προσμίξεις ως υπόστρωμα για τα φυτά. Η άρδευση (Εικόνα 101) στην πλειονότητα των θερμοκηπίων αυτών γίνεται με αυτόματο σύστημα άρδευσης επικουρούμενου από συμπτωματικές αρδεύσεις με λάστιχο ποτίσματος. Μόνο αυτόματο σύστημα άρδευσης υπάρχει μόνο σε θερμοκήπια που χρησιμοποιούνται ως φυτώρια. Σε σημαντικό ποσοστό των θερμοκηπίων (30%) η άρδευση γίνεται μόνο με χρήση λάστιχου ποτίσματος. Όσο αφορά τη διαχείριση, στο 100% των περιπτώσεων το πρόγραμμα άρδευσης καταστρώνεται με βάση την εμπειρία και διορθώνεται με βάση παρατηρήσεις της εικόνας των φυτών. Στο 50% των συστημάτων (Εικόνα 102) αυτόματου συστήματος υπάρχει δυνατότητα μόνο χρονικού προγραμματισμού, ενώ τα υπόλοιπα συστήματα έχουν κάποιους αισθητήρες για λήψη πληροφορίας σχετικά με την εξατμισοδιαπνοή ή/και την υδατική κατάσταση του εδάφους. Σε ορισμένες περιπτώσεις φυτωρίων καταγράφηκαν και ιδιαίτεροι αισθητήρες όπως το τεχνητό φύλλο (mist-o-matic sensor).



Εικόνα 102 Χρήση αισθητήρων για διαχείριση της άρδευσης σε θερμοκήπια βοτανικών κήπων

Από τα πολλά γενικά σχόλια που συλλέχθηκαν βγαίνει το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση των βοτανικών κήπων, τα θερμοκήπια και ιδιαίτερα όσα χρησιμοποιούνται για έκθεση φυτών έχουν το χαρακτηριστικό ότι φιλοξενούν πολλά διαφορετικά είδη φυτών σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη δοχείων. Η τεχνολογική υποστήριξη ως προς την άρδευση είναι καλοδεχούμενη αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως την εμπειρική κατάσταση προγραμμάτων άρδευσης και το χειρονακτικό πότισμα. Πολλοί διαχειριστές ισχυρίζονται ότι η χρήση αυτόματων συστημάτων θα ήταν καταστροφική για τα φυτά. Βέβαια η εικόνα αυτή αλλάζει στα θερμοκήπια που χρησιμοποιούνται ως φυτώρια, όπου συνήθως λειτουργούν αυτόματα συστήματα και αξιοποιούνται μετρήσεις αισθητήρων για τη διαχείριση της άρδευσης.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι οι δυσκολίες άρδευσης που παρουσιάζονται στα έργα πράσινου λόγω της πληθώρας φυτών και της πολύπλοκης διάταξης αυτών, παρουσιάζονται αυτούσιες στα θερμοκήπια βοτανικών κήπων που λειτουργούν για έκθεση φυτών με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η εφαρμογή αυτοματοποιημένων τεχνικών ελέγχου. Στα φυτώρια των βοτανικών κήπων που προσομοιάζουν με τα παραγωγικά θερμοκήπια οι δυνατότητες αυτοματισμών είναι πολύ μεγαλύτερες.

Κεφάλαιο 10 – Συμπεράσματα

Δείκτες υδατικής κατάστασης που βασίζονται σε δεδομένα ανάκλασης ακτινοβολίας από την καλλιέργεια

Όπως αναφέρθηκε, η πλειοψηφία των συστημάτων διαχείρισης της άρδευσης στα σύγχρονα θερμοκήπια αξιοποιεί έμμεσες μετρήσεις για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών, αφού αν και υπάρχει μία γενικευμένη αποδοχή σχετικά με τα πλεονεκτήματα των άμεσων φυσιολογικών δεικτών όσο αφορά τον χαρακτηρισμό της κατάστασης των φυτών και τον εντοπισμό σχετικών καταπονήσεων – συμπεριλαμβανομένης και της υδατικής -, η εφαρμογή τους σε πρακτικό επίπεδο παραμένει υπό διερεύνηση (Jones, 2004, Sarlikioti, 2010 και 2011).

Όταν η διαθεσιμότητα νερού στα φυτά δεν καλύπτει τις ανάγκες διαπνοής τους, εμφανίζεται υδατική καταπόνηση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα το άνοιγμα των στοματίων και εν συνεχεία η θερμοκρασία των φύλλων (Katsoulas κ.α., 2006) και ο ρυθμός φωτοσύνθεσης (Sarlikioti κ.α., 2010). Εξαιτίας αυτών, επηρεάζονται μία σειρά από παράγοντες όπως η ανάκλαση του ηλιακού φωτός (Knippling, 1970), η εκπομπή ακτινοβολίας χλωροφύλλης (φθορισμός χλωροφύλλης) (Norikane και Kurata, 2001) και η μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας (Jones και Schofield, 2008). Στο πλαίσιο αυτό, προηγούμενη έρευνα έχει καταδείξει ότι η υδατική κατάσταση του φυτού μπορεί να ανιχνευθεί μετρώντας την ακτινοβολία σε μήκη κύματος στην περιοχή του υπέρυθρου (Jackson κ.α., 1986, Penüelas κ.α., 1997, Ceccato κ.α., 2001, Jones και Schofield, 2008). Ο δείκτης θερμικής καταπόνησης (CWSI) που συνδέει την παρατηρούμενη -μέσω μετρήσεων της υπέρυθρης ακτινοβολίας- θερμοκρασία επιφάνειας με μετρημένα ή υπολογισμένα όρια θερμοκρασιών (ελάχιστο και μέγιστο) αποτελεί το πιο πετυχημένο εργαλείο που έχει προκύψει από την προσπάθεια αυτή (Jones και Schofield, 2008). Αρκετές προσπάθειες έχουν γίνει ώστε να αναπτυχθεί σχέση μεταξύ υδατικής καταπόνησης και ανάκλασης στην περιοχή του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου και ένας μεγάλος αριθμός από αυτές αφορούσαν καλλιέργειες εντός θερμοκηπίου (Penüelas κ.α., 1993, Kacira κ.α., 2005, Granta κ.α., 2006, Graeff και Claupein, 2007, Zalaluk και Sri Ranjan, 2008, Sarlikioti κ.α., 2010). Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται με το χρόνο και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η χρήση ενός μόνο μήκους κύματος μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο για τον εντοπισμό φασματικών περιοχών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για περαιτέρω διερεύνηση και όχι για να χαρακτηρίσει με επαναληψιμότητα μία φυτική επιφάνεια (Hatfield κ.α., 1985). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με το

συνδυασμό δεδομένων από περισσότερες περιοχές του φάσματος, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό φυτικούς δείκτες (Thenkabail κ.α., 2000). Οι πιο κοινές μορφές τέτοιων δεικτών είναι οι απλοί φυτικοί δείκτες που προκύπτουν από τη διαίρεση της ανάκλασης σε δύο περιοχές του φάσματος και οι φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών που υπολογίζονται διαιρώντας τη διαφορά της ανάκλασης σε δύο περιοχές του φάσματος με το άθροισμα της ανάκλασης στις ίδιες περιοχές (Zakaluk και Sri Ranjan, 2008). Οι Penñelas κ.α. (1993) βρήκαν ότι ο Water Band Index (R_{970}/R_{902}) (η τιμή αντιστοιχεί στο μήκος κύματος που αφορά η μέτρηση) μπορεί να είναι χρήσιμος ως δείκτης της υδατικής κατάστασης. Σύμφωνα με τον Nantt (2008) η υδατική καταπόνηση είναι γενικά συνδεδεμένη με αύξηση της ανάκλασης στην περιοχή των 560-710nm και μείωση για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 760nm. Οι Penñelas κ.α. (1994) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο Normalised Difference Vegetation Index ($NDVI = (R_{850} - R_{680}) / (R_{850} + R_{680})$) μειώνεται καθώς αυξάνεται η υδατική καταπόνηση. Ο Physiological Reflectance Index ($PRI = (R_{550} - R_{530}) / (R_{550} + R_{530})$) έχει αποδειχθεί ευαίσθητος στην υδατική καταπόνηση (Penñelas κ.α., 1994, Suárez κ.α., 2009, Sarlikioti κ.α., 2010).

Τα αποτελέσματα που αφορούν την ενότητα αυτή προήλθαν από μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο δύο πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν τα καλοκαίρια του 2008, του 2009 (με ζέρμπερα, *Gerbera jamesonii* cv. Balance[®], De Kwakel B.V.) και του 2010 (με ρόκα, *Eruca sativa* Mill. Rocket Commun 2[®], FytroSeeds S.A.) στο γυάλινο θερμοκήπιο του Τμήματος Ανθοκομίας – Αρχιτεκτονικής Τοπίου του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου στους Κωστακικούς Άρτας. Η καλλιέργεια ζέρμπερας (2,60 φυτά m⁻²) έγινε με ανοικτό υδροπονικό σύστημα σε γλάστρες των 4 L με υπόστρωμα ελαφρόπετρας σε πάγκους ύψους 0,85m, ενώ η καλλιέργεια ρόκας (39,4 φυτά m⁻²) με απλή άρδευση σε γλάστρες των 4 L με αμμοπηλώδες έδαφος στο επίπεδο του δαπέδου.

Μία σειρά από παραμέτρους του εναέριου περιβάλλοντος, του υποστρώματος και της καλλιέργειας (θερμοκρασία, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, υγρασία υποστρώματος, εξατμισοδιαπνοή κοκ) καταγράφονταν. Ακόμη γίνονταν καταστροφικές μετρήσεις για το συντελεστή φυλλικής επιφάνειας. Τέλος για συγκεκριμένες ημέρες από 10:00 έως 18:00 κάθε ημέρα, γίνονταν ανά 15min μετρήσεις της ανάκλασης από την κόμη της καλλιέργειας με χρήση φορητού πολυφασματικού ραδιόμετρου (MSR87, CropScan Inc., Rochester, USA). Οι μετρήσεις αφορούσαν 8 στενές φασματικές περιοχές γύρω από τα μήκη κύματος 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 και 810nm. Το ραδιόμετρο ήταν εγκατεστημένο σε ύψος 1,5 και 1m πάνω από την κόμη για την ζέρμπερα και τη ρόκα αντίστοιχα (οι αντίστοιχες επιφάνειες δείγματος, σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή ήταν 0,44 m² και 0,20 m²). Για την μείωση των θορύβων (π.χ. σκίεζ περιβάλλοντος)

χρησιμοποιήθηκε ειδική τεχνική (επιφάνεια αναφοράς) κατά τις μετρήσεις ανάκλασης. Οι μετρήσεις γίνονταν πάνω από συμπαγή φυλλική επιφάνεια και κατά την περίοδο αυτή η κουρτίνα του θερμοκηπίου ήταν μαζεμένη. Ακόμη τις ίδιες ημέρες γίνονταν ανά διαστήματα μετρήσεις στοματικής αγωγιμότητας με χρήση πορομέτρου.

Με σκοπό τη συγκέντρωση δεδομένων για την αξιολόγηση της σύνδεσης φασματικών φυτικών δεικτών και υδατικής κατάστασης εφαρμόστηκαν μία σειρά από μεταχειρίσεις. Στο πείραμα της ζέρμπερας υπήρχε μία μακρά περίοδος (2008) όπου εφαρμόζονταν δύο διαφορετικές συχνότητες άρδευσης (άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου γίνονταν ίσο με 1650 kJm^{-2} ή 3300 kJm^{-2} , με ίδια συνολική ποσότητα νερού σε διάστημα ημέρας). Το καλοκαίρι του 2009, εφαρμόστηκαν στην καλλιέργεια της ζέρμπερας για ορισμένες διακριτές ημέρες τρεις μεταχειρίσεις άρδευσης (επαρκώς αρδευόμενη: $100\%ET_c$ (όπως υπολογίζονταν από τα δεδομένα του λυσίμετρου), μερικώς αρδευόμενη: (50% ή $33\%ET_c$) και υδατικά καταπονούμενη: $0\%ET_c$). Στο πείραμα της ρόκας (καλοκαίρι 2010) εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης: 33% , 66% και 100% της ET_c (όπως υπολογίζονταν από τα δεδομένα του λυσίμετρου), επί 15 ημέρες κατά τη διάρκεια της μέσης περιόδου (mid-season) της καλλιέργειας. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις από κάθε μεταχείριση για την σύγκριση μέσων τιμών που έγινε μέσω ελέγχων t-student test σε επίπεδο σημαντικότητας 95% με χρήση του PlotIT (Scientific Programming Enterprises, USA).

Στο πλαίσιο της έρευνας, μελετήθηκαν οι ακόλουθοι φυτικοί δείκτες:

- SB – απλά μήκη κύματος (ανάκλαση σε κάθε ένα από τα διαφορετικά μήκη κύματος του πολυφασματικού ραδιόμετρου,
- SR – φυτικοί δείκτες απλών λόγων (όλοι οι διαθέσιμοι συνδυασμοί από τα διαθέσιμα μήκη κύματος),
- μία σειρά από φυτικούς δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών, με έμφαση (βάση των σχετικών βιβλιογραφικών αναφορών καθώς και των πρώτων αποτελεσμάτων από την αξιολόγηση των SB και SR) στους ακόλουθους:
 - $sPRI = (R560 - R510)/(R560 + R510)$ (δείκτης παρόμοιος με τον PRI- Physiological Reflectance Index, ο PRI χρησιμοποιεί την ανάκλαση στα 530 και 550 nm, αλλά αυτά τα μήκη κύματος δεν ήταν διαθέσιμα στο όργανο που χρησιμοποιήθηκε και έτσι επιλέχθηκαν τα κοντινότερα διαθέσιμα μήκη κύματος,
 - $sNDVI1 = (R810 - R710)/(R810 + R710)$, $sNDVI2 = (R810 - R560)/(R810 + R560)$ και $sNDVI3 = (R810 - R660)/(R810 + R660)$.

Το τυπικό φάσμα ανάκλασης από μία καλλιέργεια (Knippling, 1970), παρουσιάζει σχετικά χαμηλές τιμές από τα 450 έως τα 650nm -με μία έξαρση στην περιοχή του

πράσινου- και υψηλότερες τιμές από τα 650nm έως την αρχή του κοντινού υπέρυθρου. Στην Εικόνα 49 παρουσιάζονται τα φάσματα ανάκλασης φυλλικής επιφάνειας ζέρμπερας υπό διάφορες υδατικές μεταχειρίσεις (100%ET_c, 50%ET_c και 0%ET_c) το μεσημέρι μίας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας. Η στατιστική ανάλυση επιβεβαίωσε μία ισχυρή θετική συνδιακύμανση όσο αφορά την μεταβολή των καμπυλών. Το φάσμα της υπό καταπόνηση μεταχείρισης (0%ET_c) διαφέρει σημαντικά από αυτά των αρδευόμενων (50%ET_c και 100%ET_c). Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και από την καλλιέργεια ρόκας.

Στο πλαίσιο της πρώτης περιόδου του πειράματος με ζέρμπερα έγινε μία αρχική προσπάθεια αξιολόγησης επιλεγμένων φασματικών δεικτών ανάκλασης και τελικά η καλύτερη απόκριση παρατηρήθηκε για το δείκτη sPRI, ο οποίος παρουσίαζε πολύ καλή συσχέτιση με την στοματική αγωγιμότητα της φυλλικής επιφάνειας.

Κατά τη δεύτερη περίοδο μετρήσεων στην ζέρμπερα, δόθηκε έμφαση στην αξιολόγηση σύνθετων φασματικών δεικτών και βρέθηκε ότι ο sPRI και οι sNDVI1 και sNDVI3 είχαν μικρότερες τιμές για μετρήσεις πάνω από επιφάνειες υπό υδατική καταπόνηση, αποτέλεσμα που βρισκόταν σε συμφωνία και με άλλους ερευνητές (Penñelas κ.α., 1994). Για τους δείκτες αυτούς, οι τιμές μεταξύ της μεταχείρισης 0%ET_c και των αρδευόμενων μεταχειρίσεων (50%ET_c και 100%ET_c) διέφεραν σημαντικά. Από την άλλη πλευρά για τις μεταχειρίσεις 50%ET_c και 100%ET_c δεν παρουσιάζονταν σημαντικές διαφορές. Με βάση τα ίδια πειραματικά δεδομένα βρέθηκε ακόμη πως υπήρχε καλή γραμμική συσχέτιση (R^2 μεταξύ 0,7 και 0,8) για τις αρδευόμενες μεταχειρίσεις (50%ET_c και 100%ET_c) μεταξύ του θ και της ανάκλασης στα 510, 560 και 610 nm, των απλών λόγων R560/R660 και R560/R610, του sPRI και του sNDVI3. Ο CWSI (υπολογίστηκε σύμφωνα με τα προτεινόμενα από τους Jackson κ.α. (1981), 0: όχι υδατική καταπόνηση; 1: μέγιστη υδατική καταπόνηση) παρουσίασε καλή γραμμική συσχέτιση (R^2 μεταξύ 0,7 και 0,8) με την ανάκλαση στα 510 nm, το λόγο R710/R460 και το δείκτη $((R710 - R460) / (R710 + R460))$ τόσο στις αρδευόμενες όσο και στη μεταχείριση υπό υδατική καταπόνηση (0%ET_c).

Στο πείραμα με ρόκα βρέθηκε ότι οι σύνθετοι υπό αξιολόγηση δείκτες sPRI, sNDVI 1 και 2 παρουσιάζουν μείωση γύρω από το μεσημέρι, όταν η ζήτηση για νερό γίνεται περισσότερο έντονη, αλλά στατιστικά σημαντικές διαφορές υπήρχαν μόνο μεταξύ των μεταχειρίσεων 100%ET_c και 33%ET_c και 66%ET_c και 33%ET_c (Εικόνα 60). Ακόμη παρατηρήθηκε μία τάση μείωσης για όλους τους σύνθετους δείκτες που αξιολογήθηκαν όσο οι ημέρες υπό καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης (για τις μεταχειρίσεις 66%ET_c και 33%ET_c) περνούν και η θ πέφτει σταδιακά σε χαμηλότερα επίπεδα (Εικόνα 60). Ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε ανεκτές σχέσεις μεταξύ του θ και της ανάκλασης στα 710 nm ($R^2=0,73$, 0,76 και 0,74 για τις

μεταχειρίσεις 100%ET_c, 66%ET_c και 33%ET_c αντίστοιχα) και μεταξύ θ και SNDVI2 για την μεταχείριση 33%ET_c ($R^2=0,68$). Ακόμη, η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης έδειξε μία αποδεκτή γραμμική σχέση ($R^2 = 0,74$) μεταξύ sPRI και CWSI (Εικόνα 62). Φαίνεται ότι όσο η υδατική καταπόνηση αυξάνεται, ο sPRI ελαττώνεται. Αυτό το εύρημα βρίσκεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα των Sarlikioti κ.α. (2010), οι οποίοι έδειξαν ότι ο PRI, είναι αντιστρόφως ανάλογος με την αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει σχέση μεταξύ διαθεσιμότητας νερού και υδατικής κατάστασης και φασματικών δεικτών ανάκλασης στην περιοχή του ορατού και για τις δύο καλλιέργειες που μελετήθηκαν. Η ύπαρξη σημαντικών διαφορών μόνο μεταξύ αρδευόμενων και ισχυρά καταπονούμενων φυτών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάκλαση στο ορατό πιθανότατα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης μόνο όταν αυτή καθίσταται έντονη. Παρόμοιες απόψεις έχουν εκφραστεί και από τους Hunt και Rock (1989), Penñelas κ.α. (1993) και Inoue και Penñelas (2006). Φυτικοί δείκτες κανονικοποιημένων διαφορών τύπου PRI και NDVI βρέθηκε να παρουσιάζουν σε ορισμένες περιπτώσεις καλή συσχέτιση με το περιεχόμενο του υποστρώματος σε νερό ή με αναγνωρισμένους δείκτες υδατικής κατάστασης όπως η στοματική αγωγιμότητα και ο CWSI. Στην καλλιέργεια ρόκας βρέθηκε καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ sPRI και CWSI. Σε κάθε περίπτωση όμως, η χρήση μίας τέτοιας σχέσης για τον εντοπισμό υδατικής καταπόνησης με στόχο τον αυτόματο έλεγχο της άρδευσης μέσα σε θερμοκήπια δημιουργεί προβληματισμό καθώς η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει τόσο τον PRI (Sarlikioti κ.α., 2010) όσο και τον CWSI (Katsoulas, 2006).

Η αξιοποίηση πολυφασματικών φυτικών δεικτών αποτελεί ένα υποσχόμενο πεδίο έρευνας καθώς θα μπορούσε να οδηγήσει σε άμεσες και αντιπροσωπευτικές μεθόδους για την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Όταν ένα τυπικό σύστημα αυτόματου ελέγχου άρδευσης χρησιμοποιεί ως είσοδο το χρονικό ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μετριέται με ένα πυρανόμετρο τοποθετημένο εκτός του θερμοκηπίου, δεν λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση της καλλιέργειας. Πιθανότατα, στο μέλλον να προκύψει ένα σύστημα που να μπορεί να βασιστεί σε μία παρόμοια αρχή λειτουργίας, αλλά να εκτιμά τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας ολοκληρώνοντας την ανακλώμενη ακτινοβολία αντί για την προσπίπτουσα.

Δυνατότητα χρήσης δεικτών θερμικής και υδατικής καταπόνησης καλλιεργειών για τη διαχείριση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο

Στην πιο επιτυχημένη τους έκφραση οι δείκτες θερμικής και υδατικής καταπόνησης των καλλιεργειών –που λαμβάνουν υπόψη το συνδυασμό των συνθηκών του περιβάλλοντος αλλά και τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών- θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη γενικότερη διαχείριση μηχανισμών (όπως τα ανοίγματα αερισμού ή η κουρτίνα σκίασης) και συσκευών (όπως τα αερόθερμα ή η υδρονέφωση) με σκοπό τον έλεγχο του κλίματος εντός του θερμοκηπίου. Μια σειρά από προσπάθειες χρήσης εκφράσεων της υδατικής κατάστασης έχουν χρησιμοποιηθεί έως σήμερα με σκοπό τη συνολική διαχείριση του μικροκλίματος εντός του θερμοκηπίου, ενδεικτικά αναφέρεται η δουλειά των Stanghellini και Van Meurs (1992) που μελέτησαν τη δυνατότητα ελέγχου θερμοκρασίας και υγρασίας εντός του θερμοκηπίου μέσω ορισμού σημείων ρύθμισης εξατμισοδιαπνοής σε καλλιέργεια τομάτας. Ο Baille (1992) εξέτασε και αυτός τις δυνατότητες αξιοποίησης της καταγραφής της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας όσο αφορά τις γενικότερες αποφάσεις διαχείρισης του κλίματος εντός του θερμοκηπίου. Ο Baker (1995) παρουσίασε τις τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάζονται όσο αφορά την πρακτική εφαρμογή των μετρήσεων θερμικής και υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας με σκοπό το συνολικό έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Εκτενέστερη είναι η σχετική ανασκόπηση των Ehret κ.α. (2001) οι οποίοι καταλήγουν στο ότι πιθανότατα η μέτρηση της συνολικής φωτοσύνθεσης του φυτού έχει την καλύτερη δυναμική μεταξύ των καταγραφών φυσιολογικών παραμέτρων με σκοπό τον άμεσο έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων. Στο άρθρο ανασκόπησης των Kacira κ.α. (2005) τονίζεται η αξία της καταγραφής των δυναμικών αποκρίσεων των φυτών και της αξιοποίησης αυτών στο πλαίσιο μοντέλων διαχείρισης του κλίματος στα θερμοκήπια. Οι Blasco κ.α. (2007) ανέπτυξαν και αξιολόγησαν συστήματα ελέγχου του κλίματος (θερμοκρασία και υγρασία) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου βασισμένα σε γενετικούς αλγόριθμους που βασίζονται στην κατανάλωση ενέργειας και νερού. Σε κάθε περίπτωση όμως η πρακτική χρήση τέτοιων προσεγγίσεων δεν φαίνεται να είναι άμεση.

Αξιολόγηση αισθητήρων υδατικής κατάστασης του υποστρώματος σε υδροπονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες

Είναι γενικά παραδεκτό ότι η χρήση παραμέτρων που σχετίζονται με το υπόστρωμα (βασική συνιστώσα του συνεχούς ατμόσφαιρα – φυτό - υπόστρωμα) αποτελεί μία αξιόπιστη λύση σχετικά με τη διαχείριση της άρδευσης (Schroeder, 2002; Lieth και Oki, 2007; Muñoz-Carpena, 2009; Pardossi κ.α., 2009). Στο πλαίσιο αυτό ένα τμήμα της έρευνας αφορούσε την παρουσίαση αισθητήρων μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος (κυρίως υγρασίας) και την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης διαθέσιμης υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο υπόστρωμα σε υδροπονικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες και κυρίως στη δυνατότητα συνδυασμού τους με τους ποιο κοινούς τρόπους διαχείρισης της άρδευσης σε αυτές: το χρονικό προγραμματισμό και τον έλεγχο μέσω συσσώρευσης προσπίπτουσας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας (Li κ.α., 2001, Lizarraga κ.α., 2003, Lee, 2010).

Αναλύθηκε η συμπεριφορά του νερού στα υποστρώματα υδροπονίας και παρουσιάστηκαν οι διαθέσιμοι σχετικοί αισθητήρες και αξιολογήθηκε η χρήση τυπικών αισθητήρων μέτρησης υγρασίας και EC σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας. Οι μετρήσεις έγιναν την άνοιξη του 2011 και αφορούσαν υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (*Lycopersicon esculentum*, var. Belladonna, σε υποστρώματα: περλίτη ISOCON Perloflor Hydro 1 και πετροβάμβακα Grodan Expert) σε θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι: Delta - ThetaProbe, Decagon Devices - EC5, Decagon Devices - 10HS και Grodan WCM-Control. Στο πλαίσιο της αξιολόγησης καταγράφηκε και η ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό και το εσωτερικό του θερμοκηπίου ενώ εφαρμόστηκαν τρεις προσεγγίσεις άρδευσης (εμπειρικός χρονικός προγραμματισμός, υπολογισμένος χρονικός προγραμματισμός και άρδευση με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας).

Το βασικό συμπέρασμα ήταν ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα όσο αφορά την εφαρμογή αισθητήρων μέτρησης υγρασίας στο υπόστρωμα είναι η μεταβλητότητα των μετρήσεων η οποία εξαρτάται από τη θέση μέτρησης εντός του θερμοκηπίου, από τη θέση μέτρησης στο υπόστρωμα (πάνω, πλάι κοκ) όσο και από τον όγκο δείγματος μέτρησης του κάθε αισθητήρα. Πιθανότατα δεν είναι οι αισθητήρες το μεγαλύτερο πρόβλημα (εάν και σίγουρα μπορούν να γίνουν βελτιώσεις όσο αφορά τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά), αλλά μια σειρά από άλλες αιτίες που μπορεί να είναι υπεύθυνες (ομοιομορφία αρδευτικού συστήματος, πρόγραμμα κοκ) για τις αποκλίσεις που παρατηρούνται.

Δοκιμές που αφορούσαν τον συνδυασμό συστήματος άρδευσης με χρήση ολοκλήρωσης εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας για τον καθορισμό της συχνότητας άρδευσης και αισθητήρα εδαφικής υγρασίας για καθορισμό της δόσης άρδευσης και της πιθανής νυχτερινής άρδευσης ήταν επιτυχημένες.

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν σχετικά με τους αισθητήρες είναι τα ακόλουθα:

- η ακριβής τήρηση των προδιαγραφών εγκατάστασης είναι απολύτως απαραίτητη ώστε να λειτουργήσει σύμφωνα με τον αναμενόμενο τρόπο το υπόστρωμα,
- η ειδική βαθμονόμηση μειώνει σε κάποιο βαθμό την διακύμανση των μετρήσεων,
- η εγκατάσταση του οργάνου για τη λήψη μετρήσεων (μείωση συμπίεσης υποστρώματος που θα εξασφαλίζει τις μικρότερες δυνατές διακυμάνσεις στο βάθος μέτρησης), αλλά και η επιλογή χαρακτηριστικών θέσεων λήψης μετρήσεων παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην μείωση των αποκλίσεων,
- η χρήση μεγάλης επιφάνειας επαφής με υπόστρωμα (άρα μικρότερης πίεσης) δεν φαίνεται να βελτιώνει αισθητά την κατάσταση,
- η χρήση αισθητήρα με κατάλληλο για κάθε υπόστρωμα όγκο περιοχής δείγματος πιθανότατα θα βοηθούσε στην μείωση των διαφορών.

Σε κάθε περίπτωση η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί εάν αναζητηθούν συστηματικά κατάλληλες αντιπροσωπευτικές θέσεις τοποθέτησης και λαμβάνονται μετρήσεις μόνο από αυτές. Οι μετρήσεις αποτυπώνουν τη γενική τάση και τις διακυμάνσεις της υγρασίας και της EC στο υπόστρωμα και μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμες τόσο όσο αφορά την αξιολόγηση του προγράμματος άρδευσης όσο και για την παροχή ειδοποιήσεων εάν κάτι δεν πάει καλά (π.χ. βλάβη του αρδευτικού).

Ενδιαφέρον θα είχε να αξιολογηθούν σε επίπεδο παραγωγής και αποτελεσματικότητας χρήσης νερού (για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου) διάφορες εναλλακτικές σχετικά με την χρήση αισθητήρων παραμέτρων στο υπόστρωμα για διαχείριση της άρδευσης.

Παράλληλα αποτελέσματα

Παράλληλα με τα κύρια αποτελέσματα της διατριβής και στο πλαίσιο εκπόνησής της παρήχθησαν μία σειρά από αποτελέσματα που έχουν πρακτική αξία:

- έγινε σύγκριση πειραματικών μετρήσεων εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας πιπεριάς με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσεγγίσεις FAO Penman–Monteith και Stanghellini. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν πρακτικά εφαρμόσιμα αλλά οι συντελεστές συσχέτισης με τα πειραματικά δεδομένα είναι μέτριοι, γεγονός που πιστοποιεί την ανάγκη ρύθμισης των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για προσαρμογή τους σε μεσογειακές συνθήκες με ιδιαίτερη

έμφαση στην εκτίμηση των συντελεστών αεροδυναμικής και στοματικής αντίστασης,

- αξιολογήθηκε ειδική τεχνική (χρήση επιφάνειας αναφοράς) για χρήση πολυφασματικού ραδιόμετρου για μέτρηση ανάκλασης από θερμοκηπιακή καλλιέργεια,
- αναπτύχθηκε σχέση για τον υπολογισμό της επιφάνειας φύλλου με βάση το μήκος και το πλάτος αυτού αλλά και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με βάση τον αριθμό των φύλλων ανά φυτό και την πυκνότητα φύτευσης για καλλιέργεια ζέρμπερας.
- βρέθηκε ότι η εφαρμογή δύο διαφορετικών συχνοτήτων άρδευσης, υψηλή συχνότητα (HIF, άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από το θερμοκήπιο γίνονταν ίσο με 1650 kJ m^{-2}) και χαμηλή συχνότητα (LIF, άρδευση όταν το ολοκλήρωμα της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από το θερμοκήπιο γίνονταν ίσο με 3300 kJ m^{-2}) με χορήγησης ίδιας συνολικής ποσότητας νερού σε επίπεδο ημέρας δεν επηρέασε σε στατιστικά σημαντικό βαθμό τα παραγωγικά χαρακτηριστικά καλλιέργειας ζέρμπερας, όμως η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (WUE) ήταν υψηλότερη στην μεταχείριση LIF,
- εκτιμήθηκε ο φυτικός συντελεστής καθώς και μία σειρά από παραμέτρους (στοματική αγωγιμότητα, δείκτης φυλλικής επιφάνειας, albedo κοκ) που είναι απαραίτητες για την εκτίμηση των αναγκών θερμοκηπιακής καλλιέργειας ρόκας σε νερό,
- αξιολογήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις προγραμματισμού άρδευσης. Όσο αφορά την αξιολόγηση της άρδευσης είναι φανερό ότι ο προγραμματισμός με βάση τη συγκέντρωση ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία διατηρεί το υπόστρωμα πιο κοντά στην υδατοικανότητα φυτοδοχείου, δαπανώντας παρόμοιες ποσότητες νερού. Κατά τις ηλιόλουστες ημέρες πρέπει η πρώτη άρδευση να γίνεται σε διάστημα λιγότερο από 2 ώρες από την ανατολή του ηλίου (ώστε να μην έχουμε μεγάλη νυχτερινή πτώση της υγρασίας στο υπόστρωμα και αντίστοιχη αύξηση της EC). Ακόμη τις ηλιόλουστες ημέρες συνίστανται συχνότερες αρδεύσεις μικρότερου όγκου ώστε να αποφεύγονται μεγάλες διακυμάνσεις της EC.
- βαθμονομήθηκαν μία σειρά από αισθητήρες μέτρησης διηλεκτρικής χωρητικότητας για την μέτρηση της υγρασίας σε κοινά υποστρώματα υδροπονίας (πετροβάμβακα και περλίτη),
- έγινε μία πρώτη διερεύνηση σχετικά με τις μεθόδους διαχείρισης της άρδευσης που εφαρμόζονται σε θερμοκήπια που είναι ενταγμένα σε έργα πράσινου και συγκεκριμένα σε βοτανικούς κήπους.

Βιβλιογραφία

- Abou-Hadid, A.F., El-Shinawy, M.Z., El-Oksh, I., Gomaa, H., El-Beltagy, A.S., Cockshull, K.E., Tüzel, Y., Gül, A., 1994. Studies on water consumption of sweet pepper under plastic houses. *Acta Hort.* 366, 365–371.
- Ajayi, A.E., Olufayo, A.A., 2004. Evaluation of Two Temperature Stress Indices to Estimate Grain Sorghum Yield and Evapotranspiration. *Agron. J.* 96, 1282–1287.
- Akat, O., I.H. Tüzel, and M.E. Özzambak. 2009. The effects of different salinity levels and leaching fractions on yield and water consumption of gerbera plants. *Acta Hort.* 807:233-238.
- Akoumianakis, K.A., Passam, H.C., Barouchas, P.E., Moustakas, N.K., 2008. Effect of cadmium on yield and cadmium concentration in the edible tissues of endive (*Cichorium endivia* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.). *J. Food Agr. Env.* 6 (3&4), 206-209.
- Al Naddaf O., Livieratos I., Stamatakis A., Tsirogiannis I., Gizas G., Savvas D., 2011. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags. *Scientia Horticulturae*, 129(1): 135-141.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011α. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agr. Water Manage.* 98, 899–920.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011β. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. *Agr. Water Manage.* 98, 921–929.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome, p. 300 (Irrigation and Drainage paper, n. 56).
- Al Riahi, M., AL-Karaghoul, A., Hasson, A.M., AL. Kayassi N., 1989. Relations between radiation fluxes of a greenhouse in semi-arid conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 44: 329-338.
- Antunez A., Whiting M.D., Pierce F.J. and Stöckle C., 2008. Estimation of Sweet Cherry Tree Water Status by Spectral Reflectance . *Acta Horticulturae (ISHS)*, 795:711-716.
- ASAE, 1996. Field evaluation of microirrigation systems. American Society of Agricultural Engineers Standards, EP405.1, St. Joseph, MI.

- ASAE, 2001. Design and installation of microirrigation systems. American Society of Agricultural Engineers Standards, EP405.1, St. Joseph, MI.
- Asrar G, Fuchs M, Kanemasu ET, Hatfield JL, 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76:300–306.
- Atarassi, R.T., Folegatti, M.V., Brasil, R.P.C., 2006. Convection regime between canopy and air in a greenhouse. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, 63(1): 77-81.
- Baas R., and Straver N.A., 2001. In situ monitoring water content and electrical conductivity in soilless media using a frequency-domain sensor. *Acta Hort.* 562: 295-303.
- Bacci L., De Vincenzi M., Rapi B., Arca B. and Benincasa F., 1998. Two methods for the analysis of colorimetric components applied to plant stress monitoring *Computers and Electronics in Agriculture*, 19: 167–186.
- Bacci, L., Battista, P., Rapi, B., Sabatini, F., Checcacci, E. 2003. Irrigation control of container crops by means of tensiometers. *Acta Hort. (ISHS)* 609, 467-474.
- Baille, A. 1992. Water status monitoring in greenhouse crops. *Acta Hort. (ISHS)* 304:15-28.
- Baille, A. 1999. Energy cycle, p. 265–286 In: G. Stanhill. H. Zvi Encoch (eds.). *Ecosystems of the World 20: Greenhouse ecosystems*.
- Baille, A., Kittas, C., Katsoulas, N., 2001. Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agr. Forest Meteorol.* 107, 293–306.
- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.-Amsterdam*. 59, 217-232.
- Baker N.R., Ort D.R., 1992. Light and crop photosynthetic performance. *Crop Photosynthesis: Spatial and Temporal Determinants*, pp. 289–312. London: Elsevier Science Publishers B.V.
- Baker N.R., Rosenqvist E., 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55, 1607–1621.
- Bakker, J.C. 1995. Greenhouse climate control: constraints and limitations. *Acta Hort. (ISHS)* 399:25-36.
- Bastug, R. O. Karaguzel, K. Aydinsakir, and D. Buyuktas. 2006. The effects of drip irrigation on flowering and flower quality of glasshouse gladiolus plant. *Agric. Wat. Man.* 81:132-144.
- Bauer M.E., 1985. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. *Proceedings of I.E.E.E.*, 73: 1071-1085.

- Bausch W.C. (1995) Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management*, 27, 55–68.
- Ben Asher, J., Ephath, J.E., Shomron, M. and Blumberg, D.G. 2008. Cooling of leafy vegetables in greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)* 797:87-94.
- Ben-Asher J., Phene C.J. and Kinarti A., 1992. Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 22: 379-390.
- Bilderback, T.E. and W.C. Fonteno. 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5:180–182.
- Biran, I. and A. Eliassaf. 1980. The effect of container shape on the development of roots and canopy of woody plants. *Sci. Hortie.* 12:183-193.
- Blad L.B. and Walter-Shea E.A., 2008. Total Leaf Tissue Water Potential (FIFE), Research Report
- Blamey, M., Grey-Wilson, C., 1989. *Flora of Britain and Northern Europe*. Hodder & Stoughton, London.
- Blasco X., Martinez M., Herrero J.M., Ramos C., Sanchis J., 2007. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and Electronics in Agriculture* 55: 49–70.
- Bougoul S., Boulard T., 2006. Water dynamics in two rockwool slab growing substrates of contrasting densities. *Scientia Horticulturae* 107: 399–404.
- Bougoul S., Ruy S., de Groot F., Boulard T., 2005. Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture - Review. *Scientia Horticulturae* 104:391–405
- Bowman W.D., 1989. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing of Environment*, 30, 49–255.
- Boyer, J.S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf area water potentials. *Plant Physiol.* 46:233–235.;
- Bradford, K.J., and T.C. Hsiao. 1982. Physiological responses to moderate water stress. p. 263–324. In O.L. Lange et al. (ed.) *Physiological plant ecology. II. Water relations and carbon assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series. Vol. 12B*. Springer-Verlag, New York.
- Burt, C.M., A.J. Clemmons, T.S. Strelkoff, K.H. Solomon, R.D. Bliesner, L.A. Hardy, T.A. Howell, and D.E. Eisenhauer. 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(6):423-442.

- Buschmann C., Langsdorf G. and Lichtenthaler H.K., 2000. Imaging of the blue, green, and red fluorescence emission of plants: An Overview *Photosynthetica*, 38: 483-491.
- Carter G.A., 1993. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 80: 239-243.
- Carter, G.A. 1991. Primary and secondary effects of the water content on the spectral reflectance of leaves. *Am. J. Bot.* 78:916–924.
- Casa R. and Jones H.G., 2004. Retrieval of crop canopy properties: a comparison between model inversion from hyperspectral data and image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 1119-1130.
- Ceccato P., Flasseb S., Tarantolac S., Jacquemoudd S. and Gregoirea J.M., 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22– 33.
- Chaerle K., Leinonen I., Jones H.G. and Van Der Straeten D., 2007. Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *Journal of Experimental Botany*, 58: 773-784.
- Chaves M.M., Pereira J.S., Maroco J., Rodrigues M.L., Ricardo C.P.P., Oso/ rio M.L., Carvalho I., Faria T., Pinheiro C., 2002. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of Botany*, 89, 907–916.
- Christiansen, J.E., 1942. Irrigation by sprinkling. *California Agric. Exp. Stn. Bull.* 670. University of California, Berkley.
- Clegg P., Watkins D., 1980. The complete greenhouse book, Garden Way Publ.
- Cobos D.R., 2008 α , 10HS Volume of Sensitivity Decagon Devices, Application Note.
- Cobos D.R., 2008 β . EC-5 Volume of Sensitivity. Decagon Devices.
- Cobos D.R., Chambers C., 2010. Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors. Decagon Devices, Application Note, Revised 11/17/10.
- Cohen W.B., 1991. Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 9: 1865-1876.
- Cornic G., 2000. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture – not by affecting ATP synthesis. *Trends in Plant Science*, 5, 187–188.
- Cure, W.W., Flagler, R.B. and Heagle, A.S. 1989. Correlations between canopy reflectance and leaf temperature in irrigated and droughted soybeans. *Rem. Sens. Env.* 29:273-280.

- Dalton F.N., Poss J.A., 1990. Soil water content and salinity assesment fro irrigation scheduling using time-domain reflectometry: Priciples and applications. *Acta Hortic.* 278, 381-393.
- Danson F.M., Aldakheel Y.Y., 2000. Diurnal water stress in sugar beet: spectral reflectance measurements and modeling. *Agronomie*, 20, 31–39.
- Danson F.M., Steven M.D., Malthus T.J., Clark J.A., 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 461–470.
- Darling D., 2008. Encyclopedia of Science-Botany, 2008 (<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/transpiration.html>).
- Decagon Devices, 2011. Calibration Equations for the ECH2O EC-5, ECH2O-TE and 5TE Sensors. Application Note 13392-03.
- Decagon Devices, Inc, 2009. 10HS Soil Moisture Sensor Operator's Manual. Pullman WA 99163.
- Decagon Devices, Inc, 2010. EC-20, EC-10, EC-5 Soil Moisture Sensors. User's Manual, Version 10. Pullman WA 99163.
- Decagon Devices, Inc., internet site, <http://www.decagon.com/>. Visited: 10/1/2011
- Dobrowski S.Z, Pushnik J.C., Zarco-Tejada P.J. and Ustin S.L., 2005. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*, 97: 403 – 414.
- Donatelli, M., Bellocchi, G., Carlini, L., 2006. Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. *Europ. J. Agronomy* 24:186–192.
- Dukes M.D., 2000. Types and Efficiency of Florida Irrigation Systems. Dept. of Agricultural & Biological Engineering, University of Florida, Gainesville, FL.
- Ehret D.L., Laub A., Bittman S., Lin. W., Shelford T., 2001. Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie* 21: 403–414.
- Eitela J.U.H., Gessler P.E., Smith A.M.S. and Robberecht, 2006. Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in *Populus* spp. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3): 170-182.
- Elachi C. (1987) *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, pp. 66–71. New York: John Wiley.
- El Shikha D.M., Waller P., Hunsaker D., Clarke T. and Barnes E., 2007. Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92: 183–193.

- Erdem, Y., Arinb, L., Erdem, T., Polat, S., Deveci, M., Okursoy, H., Gültas, H.T, 2010. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Agr. Water Manage.* 98, 148–156.
- Exarchou, E., 2006. Phytomonitoring, irrigation system, sensing, WUE, Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät.
- FAO, 2008. CropWat. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html. Προσπελάστηκε: 15 Μαρ 2008
- Fernandez, M. D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., Lopez, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E., 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig Sci* 28:497–509.
- Fu, J., 2008. Effects of different harvest start times on leafy vegetables (lettuce, pak choi and rocket) in a reaping and regrowth system. MSc Thesis, Lincoln University. Christchurch.
- Gamon J.A., Penüelas J., and Field C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41: 35-44.
- Gamon JA, Surfes JS, 1999. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytol* 143:105–117.
- Gausman H.W., 1974. Leaf reflectance of near infrared. *Photogrammetric Engineering*, 40: 183-191.
- Gausman H.W., Allen W.A., Escobar D.E., Richardson A.J., Cardenas R., 1971. Age effects of cotton leaves on light reflectance, transmittance, and absorption and on water content and thickness.. *Agronomie Journal*, 43, 465–469.
- Gitelson A, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D (2002) Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens Environ* 80:76–87
- Gizas, G. and D. Savvas. 2007. Particle size and hydraulic properties of pumice affect growth and yield of greenhouse crops in soilless culture. *HortScience* 42:1274–1280.
- Graeff S., Claupein W., 2007. Identification and discrimination of water stress in wheat leaves (*Triticum aestivum* L.) by means of reflectance measurements. *Journal Irrigation Science*, 26(1): 61-70.
- Grant L., 1987. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22: 309 322.

- Granta O.M., Chavesa M.M. and Jones H. G., 2006. Optimizing thermal imaging as a technique for detecting stomatal closure induced by drought stress under greenhouse conditions. *Physiologia Plantarum*, 127(3): 507-518.
- Grodan B.V., 2011. WCM-control, User manual / v5. Διαθέσιμο στο: www.grodan.com
- Grodan, 2010. Warer Content Meter. Διαθέσιμο στο: <http://www.grodan.com/solutions/water+content+meter>.
- Gurovich L.A. and Gratacos E. 2002, Phytomonitoring Applications in Irrigation Management, Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources (13-15, March 2002, Iguacu Falls, Brazil): 896-900.
- Hasson, A.M., 1990. Radiation components over bare and planted soils in a greenhouse. *SolarEnergy*, 44(1):1-6.
- Hatfield J.L., Kanemasu ET, Asrar G, Jackson RD, Pinter PJ Jr, Reginato RJ, Idso SB. 1985. Leaf-area estimation from spectral measurements over various planting dates of wheat. *International Journal of Remote Sensing* 6(1): 167–175.
- Hetiaratchi D.R.P. and Ahmed M., 1991. A Plant Analogue Sensor for Irrigation Scheduling. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 48: 37-55.
- Hillell, D. 1980. Fundamentals of soil physics. Academic Press, New York. 413 pp.
- Hix J., 1996. The glasshouse. Phaidon Press Ltd. London.
- Hochmuth G., 2001. Fertilizer management for greenhouse vegetables. Florida greenhouse vegetable production book. vol. 3. Univ. fo Florida Coop. Ext. Serv. SP48:HS797.
- Hochmuth G.J., 2001. Irrigation of Greenhouse Vegetables (HS786) – Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook, Vol 3. University of Florida Extension Institute of Food and Agricultural Sciences - Irrigation of Greenhouse Vegetables (<http://edis.ifas.ufl.edu>).
- Hortimax, 2010. Τεχνικό φυλλάδιο ProDrain Διαθέσιμο στο: www.hortimax.com.
- Hortimax, 2011. CropView leaflet, Διαθέσιμο στο: www.hortimax.com.
- Howell T.A. and Musick J T., 1984. Responses of cotton water stress indicators to soil salinity. *Irrigation Science*, 5: 25-36
- Howell, T., 2002. New Ideas for Improving Irrigation Water Use Efficiency. Report in the framework of the Research Project: Irrigation Methods, Technology and Management for Increased Water Use Efficiency
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24:519–570.

- Huete A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295–309
- Hunt E.R. and Rock B.N. Jr, 1989. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sens. Environ*, 30:43-54.
- Idso S.B., Jackson R.D., Pinter P.J.Jr, Reginato R.J. and Hatfield J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45–55.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J., 1977. Remote sensing of crop yields. *Science* 196, 19–25.
- Inoue and Penuelas, 2006. Relationship between light use efficiency and photochemical reflectance index in soybean leaves as affected by soil water content, *International Journal of Remote Sensing*. 27, 5109 – 5114.
- Jackson R.D. and Ezra C.E., 1985. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 6: 177-185.
- Jackson R.D., 1986. Remote Sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology*, 24: 265-287.
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J. and Pinter P.J.Jr., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4): 1133–1138.
- Jackson R.D., Huete AR, 1991. Interpreting vegetation indices. *Prev Vet Med* 11:185–200.
- Jackson RD, Pinter PJ Jr, Reginato RJ, Idso SB, 1986. Detection and evaluation of plant stresses for crop management decisions. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 24:99–106
- Jackson, R.D., Huete, A.R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.* 11: 185-200.
- Jackson, R.D., Pinter, P.J. Jr., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1986. Detection and evaluation of plant stresses for crop management decisions. *IEEE Trans Geosci. Rem. Sens.* 24, 99–106.
- Janssens, M., Deng, Z., Mulindabiqwi, V., Sonwa, D., Torrico, J.C., Pohlen, J.M., 2005. Eco-volume and bio-surface interplay with the universal scaling laws in biology. *Agroforestry* - PT150.
- Jarvis P.G. and McNaughton K.G, 1985. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15: 1-49.
- Joliet O., 1999. The Water Cycle. *Greenhouse Ecosystems*, Chapter 13. Elsevier, The Netherlands.

- Jones H.G., Schofield P. 2008. Thermal and other Remote Sensing of Plant Stress. *Gen. Appl. Plant Physiology, Special Issue*, 34(1-2): 19-32.
- Jones H.G., 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 139-149.
- Jones H.G., 2004 α . Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advanced Botanical Research*, 41: 107-163.
- Jones H.G., 2004 β . Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407): 2427-2436.
- Jones, H.G. and Schofield, P. 2008. Thermal and other remote sensing of plant stress. *Gen. Appl. Plant Phys.* 34(1-2):19-32.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* 55 (407), 2427-2436.
- Kacira M. and Ling P.P., 2001. Design and Development of an Automated and Non-Contact Sensing System for Continuous Monitoring of Plant Health and Growth. *Transactions of the ASAE*, 44(4): 989-996 .
- Kacira M., P. P. Ling, 2002. Establishing Crop Water Stress Index (CWSI) Threshold Values For Early, Non-Contact Detection Of Plant Water Stress. *Transactions of the ASAE Vol.* 45(3): 775-780.
- Kacira M., Sase S., Okushima L., Ling P.P., 2005. Plant response-based sensing for control strategies in sustainable greenhouse production. *J. Agric. Meteorol.* 61 (1): 15-22.
- Kacira, M., P. P. Ling, and T. H. Short. 2002. Machine vision extracted plant movement for early detection of plant water stress. *Trans. ASAE* 45(4): 1147-1153.
- Kanemasu E.T., Asrar. G. and Yoshiijia, M., 1985. Remote sensing techniques for assessing water deficits and modeling crop response. *HortScience*, 20, 1043-1046.
- Kanemasu ET, 1974. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum, and soybean. *Remote Sens Environ* 3:43-47.
- Kargas G., Kerkides P. 2008. Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 ThetaProbe. *Irrig. and Drain.* 57: 435-449.
- Kargas G., Kerkides P. 2009. Performance of the theta probe ML2 in the presence of nonuniform soil water profiles. *Soil & Tillage Research* 103: 425-432.
- Katerji, N., B. Itier, and I. Ferreira. 1988. Etude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride (A study of several

- indicators of the water status of a tomato crop in a semi-arid region). *Agronomie*. 8:425-433.
- Katerji, N., Rana, G., 2006. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 138:142–155.
- Katsoulas N., A. Baille, and C. Kittas. 2002. Influence of leaf area index on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. *Bios. Eng.* 83:349-359.
- Katsoulas N., C. Kittas, G. Dimokas, and Ch. Lykas. 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. *Bios. Eng.* 93:237-244.
- Katsoulas N., C. Kittas, I. L. Tsirogiannis, E. Kitta, and D. Savvas. 2007. Greenhouse microclimate and soilless pepper crop production and quality as affected by a fog evaporative cooling system. *Trans. ASABE*. 50(5): 1831-1840.
- Katsoulas N, Baille A., Kittas C., 2001, Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 106: 233–247.
- Katsoulas, N., Baille, A., Kittas, C., 2002. Influence of leaf area index on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. *Biosys. Eng.*, 83(3): 349–359.
- Katsoulas, N., C. Kittas, G. Dimokas, and Ch. Lykas. 2006. Effect of irrigation frequency on rose flower production and quality. *Bios. Eng.* 93:237-244.
- Keller J. and Karmeli D., 1974. Trickle irrigation design parameters. *Transaction of the ASAE*, 7, 678-684.
- Khaoua, S.A.O., Bournet, P.E., Migeon, C., Boulard, T., Chasseriaux, G., 2006. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosys. Eng.*, 95(1): 83–98.
- Kleman, J.K. and E. Fagerlund. 1987. Influence of different nitrogen and irrigation treatments on the spectral reflectance of barley. *Remote Sensing of Environment* 21: 1-14.
- Knipling, E.B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sens. Environ.* 1: 155-159.
- Kogan F.N., 1990. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in Non-Homogeneous Areas. *Int. J. Rem. Sens.*, 11, 1405-1419
- Kogan F.N., 1997. Global Drought Watch From Space. - *Bull. Am. Met. Soc.*, 78, 621-636.
- Koksal E.S., Gungor Y., Yildirim Y.E., 2011. Spectral reflectance characteristics of sugar beet under different levels of irrigation water and relationships between growth parameters and spectral indexes. *Irrigation and Drainage* 60: 187-195.

- Krause G.H., Weis E., 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42, 313–349.
- Labovitz M.L., Maskova E.L. and Feldman S.G., 1984. Changes in vegetation spectra with leaf deterioration under two methods of preservation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 1737-1745.
- Lawlor D.W., Tezara W., 2009. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of Botany*, 103, 561–579.
- Lea-Cox J.D., Ristvey A.G., Ross D.S. and Kantor G.F., 2009. Deployment of Wireless Sensor Networks for Irrigation and Nutrient Management in Nursery and Greenhouse Operations. *SNA Research Conference Vol. 54 - Water Management Section* 28.
- Lee A., 2010. Water and EC management. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, March/April, 2010
- Lee B.W. and Shin J.H., 1998. Optimal Irrigation Management System of Greenhouse Tomato based on Stem Diameter and Transpiration Monitoring, *The Asian Federation for Information Technology in Agriculture* 87-87.
- Leinonen I., H.G. Jones, 2004. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *J. Exp. Bot.*, 55, 1243-1231.
- Leinonen I., O.M. Grant C.P.P. Tagliavia, M.M. Chaves, H.G. Jones, 2006. Estimating stomatal conductance with thermal imagery. *Plant, Cell and Environ.*, 29, 1508-1518.
- Leith H., Oki L. 2008. Irrigation in Soiless Production (Chapter 4 in: *Soiless Culture: Theory and Practice*, eds.: Michael Raviv and J.H. Lieth. p. 117–156) Elsevier Publisher.
- Lemmon K., 1962. *The covered garden*, Museum Press Ltd London.
- Lenk S., L. Chaerle E.E. Pfundel, G. Langsdorf, D. Hagenbeek, H.K. Lechtenthaler, D. Van Der Straeten, C. Buschmann, 2007. Multispectral fluorescence and reflectance imaging at the leaf level and its possible applications. *J. Exp. Bot.*, 58, 807-814.
- Lhommea, J.P., Chehbouni, A., Elguero, E., Boulet, G., 2002. Examination of monteith's parameterization of canopy resistance, *Scientific Report. ORSTOM/Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, Mexico*.
- Li Y.L., Stanghellini C., 2001., Analysis of the effect of EX and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* 89: 9 -21.

- Liang J., Zhang J., Wong M., 1997. Can stomatal closure caused by xylem ABA explain inhibition of leaf photosynthesis under soil drying? *Photosynthesis Research*, 51, 149–159.
- Lichtenthaler H.K., Babani F., 2000. Detection of photosynthetic activity and water stress by imaging the red chlorophyll fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38, 889–895.
- Lichtenthaler H.K., J. Miehe, 1997. Fluorescence imaging as a diagnostic tool for plant stress. *Trends in Plant Science*, 2, 316-320.
- Lieth H., and Oki L., 2007. *Irrigation in Soilless Production*.
- Lin C.P., 2003. Frequency domain versus travel time analysis of TDR waveforms for soil moisture measurements. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 67: 720-729.
- Lizarraga A., Boesveld H., Huibers F. and Robles C., 2003. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navara, Spain. *Irrigation and drainage*: 52: 177–188.
- Löfkvist K., 2010. *Irrigation and Horticultural Practices in Ornamental Greenhouse Production - Implementation of Scientific Knowledge into Irrigation Practices and Methods*. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of LTJ, Department of Horticulture. Alnarp.
- Maloupa, E., A. Papadopoulos, and S. Bladenopoulou. 1993. Evapotranspiration and preliminary crop coefficient of gerbera soilless culture grown in plastic greenhouse. *Acta Hort.* 335:519-526.
- Maloupa, E., M.N. Fakhri, K. Chartzoulakis, and D. Gerasopoulos. 1996. Effects of substrate and irrigation frequency on growth, gas exchange and yield of gerbera cv. Fame. *Adv. Hort. Sci.* 10:195-198.
- Manios, V.I., M.D. Papadimitriou, and M.D. Kefakis. 1995. Hydroponic culture of tomato and gerbera at different substrates. *Acta Hort.* 408:11-16.
- Marcelis L.F.M., Dieleman J.A., Kittas C., De Groot F., Buschmann C., Van Loon A., Boulard T., Brajeul E., Kocsanyi L., Garate A., Wieringa G. (2006) CLOSYS: closed system for water and nutrient management in horticulture. *Acta Horticulturae*, 718, 375–382.
- Meijer J.; Both G. P. A.; Stanghellini C., Cate A. J. Development and Application of a Sensitive, High Precision Weighing Lysimeter for use in Greenhouses. *J. agric. Engng Res.* 32,321-336.
- Meyer S., B. Genty, 1999. Heterogeneous inhibition of photosynthesis over the leaf surface of *Rosa rubiginosa* L. during water stress and abscisic acid treatment: induction of a metabolic component by limitation of CO₂ diffusion. *Planta*, 210, 126-131.

- Meyer W., Reicosky D.C., and Schaefer N.L., 1985. Errors in field measurement of leaf diffusing conductance associated with leaf temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. 36, 55-64.
- Michels P., Feyen J., 1984. Automatic Control of Irrigation in Greenhouses by Simulation of the Water Balance in the Root Zone. *J. agric. Engng Res.* 29,223-230.
- Milks, R.R. 1986. Culture and water relations of *Pelargonium x Hortorum* Bailey 'Ringo Scarlet' seedlings established with limited root volumes. Ph.D. thesis. N.C. State University, Raleigh.
- Milks, R.R.; Fonteno, W.C.; Larson, R.A., 1989 α . Hydrology of horticultural substrates. I. Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 114(1): 48-52.
- Milks, R.R.; Fonteno, W.C.; Larson, R.A., 1989 β . Hydrology of horticultural substrates. II. Predicting physical properties of media in containers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 114(1): 53-56.
- Milks, R.R.; Fonteno, W.C.; Larson, R.A., 1989 γ . Hydrology of horticultural substrates. III. Predicting air and water content of limited-volume plug cells. *Hydrology of horticultural substrates. II. Predicting physical properties of media in containers. Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 114(1): 57-61.
- Miralles, J., van Iersel M.W., Bañón, S., 2010. Development of Irrigation and Fertigation Control Using 5TE Soil Moisture, Electrical Conductivity and Temperature Sensors. The Third International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance, Impedance and TDT (2010, Murcia, Spain), Applications, Paper 2.10 Paper 2.10 – Page 1.
- Mogensen, V.O., Jensen, C.R., Poulsen, H.-H., Mortensen, G., Thage, J.H. and Koribidis, J. 1997. Reflectance Index for Early Determination of Water Stress. *Acta Hort. (ISHS): II International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops* 449:393-400.
- Mohan S., N. Arumugam, 1996. Review article Expert system applications in irrigation management: an overview *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 17, Issue 3, June 1997: 263-280.
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Álvarez, A.J., 2004. Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.*, 125: 33–51.

- Moran, M.S., P. Pinter, B.E. Clothier, and S.G. Allen. 1989. Effect of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfalfa. *Remote Sens. Environ.* 29:251-261.
- Moran, M.S., T.R. Clarke, Y. Inoue, and A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 46:246-263.
- Mpusia, P. T. O., 2006. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation. MSc Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands
- Munoz-Carpena R., Dukes M.D., Li Y.C. and Klassen W., 2005. Field comparison of tensiometer and granular matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. *HortTechnology*, 15 584-590.
- Muñoz-Carpena, R. 2009. Field devices for monitoring soil water content. *Florida Coop. Ext. Serv. Bull.* 2009, 343, 1-17.
- Murase H., Honami N., Nishiura Y., 1995. A neural network estimation technique for plant water status using the texture features of pictorial data of plant canopy, *Acta Hort.* 399: 255–262.
- Nantt, D., 2008. CropScan (<http://www.cropscan.com/>). Προσωπική επικοινωνία.
- Nantt, D., 2009. CropScan (<http://www.cropscan.com/>). Προσωπική επικοινωνία.
- Nederhoff, E.M., Vegter, J.G., 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouses under various CO₂-concentrations. *Annals of Botany*, 73: 353-361.
- Nemali K.S., Montesano F., Dove S.K., van Iersel M.W., 2007. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH₂O and Theta probes. *Scientia Horticulturae* 112:227–234.
- Nicola, S., Hoeberechts, J., Fontana, E., 2005. Comparison between Traditional and Soilless Culture Systems to Produce Rocket (*Eruca Sativa*) with Low Nitrate Content . *Acta Hort.* (ISHS) 697, 549-555.
- Nicola, S., Hoeberechts, J., Fontana, E., 2007. Ebb-and-Flow and Floating Systems to Grow Leafy Vegetables: A review for Rocket, Corn Salad, Garden Cress and Purslane. *Acta Hort.* (ISHS) 747, 585-593.
- Nicola, S., Hoeberechts, J., Fontana, E., Saglietti, D., 2003. Cultural Technique Influences on Post-harvest Quality of Rocket (*Eruca sativa* Mill.). *Proc. Int. Conf. Quality in Chains* Eds. Tijskens & Vollebregt. *Acta Hort.* (ISHS) 604.
- Nissen H.H., Moldrup P. and Henriksen K., 1998. High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. *Soil Sci. Am. J.*, 62: 1203-1211

- NOAA, 2009. Satellite Data - Vegetation Monitoring Products.
<http://www.bom.gov.au/sat/NDVI/NDVI2.shtml>
- Norikane J. H., Kurata K., 2001. Water Stress Detection by Monitoring Fluorescence of Plants under Ambient Light. Transactions of the ASAE Vol. 44(6): 1915–1922
- Omirou, M., 2009. Investigation of the effects of S and N fertilization in the production of glucosinolate in rocket (*Eruca sativa*) and broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) tissues and the effects from the incorporation of broccoli residues and glucosinolates in the soil to the soil microbial communities. Doctoral Thesis, Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Management and Agricultural Engineering, Athens.
- Orgaz, F., Fernandez, M.D., Bonachela, S., Gallardo, M., Fereres, E., 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agric. Water Manage. 72, 81–96.
- Owen J.S. Jr. and Altland J.E., 2008. Container Height and Douglas Fir Bark Texture Affect Substrate Physical Properties. HORTSCIENCE 43(2):505–508. 2008.
- Padulosi, S. (Eds.), 1995. Rocket Genetic Resources Network. Report of the First Meeting, 13-15 November 1994, Lisbon, Portugal. International Plant Genetic Resources Institute, Rome.
- Pagoulatou, M., 2008. Study of a new bacterial disease of rocket (*Eruca sativa*). BSc Thesis, TEI of Crete, Department of Floriculture and Greenhouse Crops, Heraklion.
- Papadopoulos, A. E. Maloupa, and F. Papadopoulos. 1995. Seasonal crop coefficient of gerbera soilless culture. Acta Hort. 408:81-90.
- Pardossi A., Incrocci L., Incrocci G., Malorgio F., Battista P., Bacci L., Rapi B., Marzioletti P., Hemming J. and Balendonck J., 2009. Review: Root Zone Sensors for Irrigation Management in Intensive Agriculture. Sensors: 9, 2809-2835.
- Penúelas J., Filella I., Araus J.L., 1997. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. Crop Science, 37, 198–202.
- Penúelas J., Filella I., Biel C., Serrano L. and Save R., 1993. The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status. Int. J. Remote Sensing, 1993, Vol. 14, No. 10, 1887-1905.
- Penúelas J., Gamon J. A., Fredeen A. L., Merino J. and Field C. B., 1994. Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen- and Water-Limited Sunflower Leaves REMOTE SENS. ENVIRON. 48:135-146

- Penúelas J., Save R., Marfa O., and Serrano L., 1992. Remotely measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 58, 63-77.
- Persson M. and Blom T.J., 2001. The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Sci. Hortic.* 88:257-276.
- Pevúelas, J., I. Filella, and J.A. Gamon. 1995. Assessment of photosynthesis radiation use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol.* 131:291-296.
- Pinter P.J. Jr, Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., Upchurch D.R., 2003. Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 647–664.
- Pittenger D., D. Shaw, 2004. What We Know About Landscape Water Requirements. CO-HORT v6.1
- POPRURA – Ειδικά υποστρώματα υδροπονίας, 2008. Interreg III Grecce – Italy, CNR – Experimental Farm “La Noria” Bari. Προσωπικό αρχείο.
- Prenger J. J., P. P. Ling, R. C. Hansen, H. M. Keener, 2005, Plant Response-Based Irrigation Control System In A Greenhouse: System Evaluation, *Transactions of the ASAE Vol. 48(3): 1175–1183*.
- Prenger J.J., Peter P. Ling, Harold M. Keener, and Robert C. Hansen, 2004, Development of a Plant Response Feedback Irrigation Control System Based on Crop Water Stress Index, Paper number 044019, 2004 ASAE Annual Meeting @ 2004.
- Prenger J.J., R. P. Fynn, R. C. Hansen, 2002. A Comparison of Four Evapotranspiration Models In A Greenhouse Environment. *Transactions of the ASAE Vol. 45(6): 1779–1788*
- Qiu G.Y., Miyamoto K., Sase S. and Okushima L., XXXX. Detection of Crop Transpiration and Water Stress by Temperature-Related Approach under Field and Greenhouse Conditions. Department of Land Improvement, National Research Institute of Agricultural Engineering Tsukuba, Ibaraki, 305-860 Japan
- Raviv M., Wallach R., Silber A., Bar-Tal A., 2002. Substrates and their analysis (Chapter 2 in: D. Savvas and H. Passam (Eds), *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals* p.p. 25-101). Embryo Publications, Athens, Greece.

- Raviv, M., and J. Blom. 2001. The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Sci. Hort.*, 88:257-276.
- Riggs, G.A., and Running S.W. 1991. Detection of canopy water stress in conifers using the airborne imaging spectrometer (AIS). *Rem. Sens. Env.* 35:51-68.
- Robert, C.P., and G. Casella. 2005. Monte carlo statistical methods. 2nd edition, Springer-Verlag. New York.
- Rogers, M.N., and B.O. Tjia. 1990. Gerbera production. Timber Press, Inc. Portland, Oregon, p. 172-176.
- Roh, M.Y., and Y.B Lee. 1996. Control of amount and frequency of irrigation according to integrated solar radiation in cucumber substrate culture. *Acta Hort.* 440:332–337.
- Rouse Jr., J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93 pp.
- Runbin D., Clifford B. F., 2009. Field study of water mass balance in a wastewater land application system. *Irrig Sci* (2009) 27:409–416.
- Sadao N., 1986. Protected horticulture in Japan. Japan F.A.O.
- Sadras, V.O., and S.P. Milroy. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Res.* 47:253–266.
- Salleo S., Nardini A., 2003. Some guidelines for monitoring desertification of Mediterranean drylands on the basis of plant water status: Methodological problems and results from the DEMOS project. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. Volume: 14, Issue: 1: 39 – 50.
- Sanchez-Guerrero M.C., Lorenzo P., Medrano E., Baille A., Castilla N., 2009. Effects of EC-based irrigation scheduling and CO₂ enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop. *Agricultural Water Management*, 96: 429-436
- Sarlikioti, V., Driever, S.M. and Marcelis, L.F.M. 2010α. Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress. *Ann. Appl. Biol.* 157:81–89.
- Sarlikioti, V., Meinen E., Marcelis L.F.M., 2011. Crop Reflectance as a tool for the online monitoring of LAI and PAR interception in two different greenhouse Crops, *Biosystems Engineering*, 108 (2): 114-120.
- Savvas D., 2009. Modern Developments in the Use of Inorganic Media for Greenhouse Vegetable and Flower Production. *Proc. IS on Growing Media 2007*, Eds.: W.R. Carlile et al. *Acta Hort.* 819.

- Savvas D., Tsirogiannis I.L., 2002. Computer - Controlled Recycling of nutrient solutions in Hydroponics by means of two alternative models", 1st Conference of Hellenic Association of ICT in Agriculture, Food and Environment, Athens 6-7 June 2002.
- Schlemmer, M.R., Francis, D.D., Shanahan, J.F. and Schepers, J.S. 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agron J.* 97:106-112.
- Schroeder F.G., Lieth J.H., 2002. Irrigation Control in Hydroponics (Chapter 7 in: D. Savvas and H. Passam (Eds), *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals* p.p. 263-298). Embryo Publications, Athens, Greece.
- Seelig H.D., Hoehn A., Stodieck L.S., Klaus D.M., Adams W.W. and Emery W.J., 2009. Plant water parameters and the remote sensing R 1300/R 1450 leaf water index: controlled condition dynamics during the development of water deficit stress . *Irrigation Science*, xx(x): xx-xxx.
- Seema, M., Hussain, A., Tabassum, Z. and Kanwal, F., 2004. Comparative Performance of Brassica Napus and Eruca Sativa under Water Deficit Conditions: An Assessment of Selection Criteria. *J. Res. (Science)*, Bahauddin Zakariya University, Multan, Pakistan, 15 (4), 439-446.
- Seginer, I. 2002. The Penman-Monteith evapotranspiration equation as an element in greenhouse ventilation design. *Biosys Eng* 82 (4): 423-439.
- Seginer, I. and M. Tarnopolsky. 2000. Response of plants to ventilation regimes: In: *Transpirational Cooling of Greenhouse Crops* (Seginer, I., D. H. Willits, M. Raviv, M.M. Peet, eds), Chapter T3, Final Report, BARD Project IS-2538-95R, pp 165-171.
- Sellers P. J., 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *INT. J. REMOTE SENSING*, 1985, VOL. 6, No.8, 1335-1372.
- Shelford T.J., Lau A.K., Ehret D.L. και Chieng S.T., 2004. Comparison of a new plant-based irrigation control method with light-based irrigation control for greenhouse tomato production. *CANADIAN BIOSYSTEMS ENGINEERING* 46 1.1-1.6.
- Sigrimis N., Arvanitis K. G., Pasgianos G. D., and Ferentinos K., 200. Hydroponics water management using adaptive scheduling with an on-line optimiser *Congrès Computational Intelligence in Crop Production CAEA'98 IFAC Workshop on Control Applications and Ergonomics in Agriculture No1*, Athens , GRECE (06/1998) 2001, vol. 31, no 1, pp. 31-46
- Singh, R., Verma, B., Prakash, C., Prasad, S.N., 1992. Effect of irrigation on yield and water use of indian mustard (*Brassica juncea*), rocket salad (*Eruca sativa*),

- safflower (*Carthamus tinctorius*) and pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Ind. J. Agric. Sci.* 62, 254-257.
- Smajstrla A.G., Boman B.J., Haman D.Z., Pitts D.J., and Zazueta F.S., 2002. Bulletin 265: Field Evaluation of Microirrigation Water Application Uniformity. Institute of Food and Agricultural Sciences, Cooperative Extension Service, University of Florida, Gainesville, FL.
- Smajstrla, A.G., B.J. Boman, G.A. Clark, D.Z. Haman, D.S. Harrison, F.T. Izuno, D.J. Pitts, and F.S. Zazueta. 1991. Efficiencies of Florida agricultural irrigation systems. Bulletin 247, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, FL.
- SmartField, 2011. Πληροφορίες από το δικτυακό τόπο της εταιρείας (<http://www.smartfield.com/>).
- Smith R.B., 2001α, Introduction to hyperspectral imaging. www.microimages.com (Προσπελάστηκε: 10/04/2009).
- Smith R.B., 2001β. Introduction to remote sensing of the environment. www.microimages.com (Προσπελάστηκε: 19/04/2009).
- Sonneveld, C. 1989. Rockwool as a substrate in protected cultivation. *Chronica Hort.* 29(3):33-36.
- Stanghellini C. and De Lorenzi F., 1994. A comparison of soil- and canopy temperature-based methods for the early detection of water stress in a simulated patch of pasture. *Journal Irrigation Science Issue Volume 14, Number 3 / February, 1994* DOI 10.1007/BF00193136 Pages 141-146.
- Stanghellini C., Van Meurs W. TH.M., 1992. Environmental Control of Greenhouse Crop Transpiration. *J. agric. Engng Res.* 51,297-311
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: An aid to climate management. PhD diss. Wageningen, The Netherlands: Agricultural University Wageningen.
- Stanghellini, C. and Van Meurs, W.Th.M., 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. Agric. Eng. Res.* 51, pp. 297–311
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: An aid to climate management. PhD diss. Agr. Un. Wageningen. Wageningen, The Netherlands.
- Stanhill, G., and A.J. Scholte. 1974. Solar radiation and water loss from glasshouse roses. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 99:107-110.
- Stradiot, P. 2001. The Grodan water content meter for root management in stonewool. *Acta Hort. (ISHS)* 548:71-78.
- Suárez L., Zarco-Tejada P.J., González-Dugo V., Berni J.A.J., Sagardoy R., Morales F. and Fereres E., 2009α. Detecting water stress effects on fruit quality in

- orchards with time-series PRI airborne imagery. Remote Sensing of Environment
- Suárez L., Zarco-Tejada P.J., Bernia J.A.J., Gonzalez-Dugoa V. and Fereres E., 2009β. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. Remote Sensing of Environment, 113(4): 730-744.
- Taiz L. και Zeiger E., 2006. Plant Physiology, 2006 Fourth Edition των [\(http://4e.plantphys.net/\)](http://4e.plantphys.net/)
- Testezlaf R., Zazueta F. S., Yeager T. H., 1997. A Real-Time Irrigation Control System for Greenhouses. Applied Engineering in Agriculture, American Society of Agricultural Engineers 0883-8542 / 97 / 1303-329 VOL. 13(3):329-332.
- Thenkabail PS, Smith RB, Pauw ED. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sensing Environment 71: 158–182.
- Thenot F., Methy M. and Winkel T., 2002. The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. Int. J. Remote sensing, 2002, vol. 23, no. 23, 5135–5139.
- Thompson R.B., Gallardo M., Valdez L.C., Fernandez M.D., 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. Agricultural Water Management 88:147–158.
- Ton Y., Kopyt M., Zachs I., Ben-Ner Z., 2001. Phytomonitoring Technique for Tuning Irrigation of Fruit Trees. ISHS Acta Horticulturae 646: International Symposium on Irrigation and Water Relations in Grapevine and Fruit Trees.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research 16, 574-582.
- Tsirogiannis I.L., 2010. Lettuce Sub Moisture Report (using Decagon 10HS substrate moisture sensor in two experiments with Coir and Posidonia Oceanica based substrates). Αδημοσίευτα στοιχεία.
- Turner N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status, Plant Soil 58:339-366.
- United States Department of Agriculture (USDA) - Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute, 1999. Soil Quality Test Kit Guide. Washington, D.C.
- van Iersel M., Seymour RM., Chappell M., Watson F and Dove S., 2009. Soil Moisture Sensor-Based Irrigation Reduces Water Use and Nutrient Leaching in

a Commercial Nursery. SNA Research Conference Vol. 54 Water Management Section 17

- von de Muizenberg E.W.B., 1980. A history of greenhouses. IMAG Wageningen.
- Widmoser P., 2010. An alternative to define canopy surface temperature bounds. *Agricultural Water Management*, 97: 224–230.
- Willits D.H., 2003. The Penman-Monteith Equation as a predictor of transpiration in a greenhouse tomato crop. ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA 27- 30 July 2003.
- Zakaluk, R. and Sri Ranjan, R. 2008. Predicting the leaf water potential of potato plants using RGB reflectance. *Can. Bios. Eng.* 50:7.1-7.12.
- Zarco-Tejada P.J, Berni J. A. J., L Suárez L., and Fereres E., 2008. A new era in remote sensing of crops with unmanned robots - Coupling small multifunctional sensors onboard unmanned aerial robots guided by autonomous navigation systems enables precision agriculture. *Remote Sensing* 17 December 2008, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1200812.1438
- Ανώνυμος. 2007. *Gerbera distinctive breeding catalogue*. Florist De Kwakel B.V., The Netherlands.
- Δρίμτσιας Ε. (DKG group, αντιπρόσωπος Grodan στην Ελλάδα), 2011. Γενικές συστάσεις εγκατάστασης Grodan και αξιοποίησης του Grodan WCM για τη διαχείριση της άρδευσης. Προσωπική επικοινωνία.
- ΔΤ Devices, 1999. ThetaProbe Soil moisture sensor, Type ML2x, User Manual, UK
- Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας (ΕΣΥΕ), 2011. Δεδομένα από το δικτυακό τόπο www.statistics.gr
- Καράταγλης Σ. 1992. ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΦΥΤΩΝ, Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη
- Κατσούλας Ν., 2002. Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή της τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Κουτσογιάννης, Δ., 2004. Διδακτικές σημειώσεις εξατμισοδιαπνοής. ΕΜΠ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.
- Μιχελάκης Ν., 1988. Συστήματα αυτόματης άρδευσης – άρδευση με σταγόνες. Εκδοτική Αγροτεχνική
- Σάββας Δ., Γκίζας Γ., Θεοδωρή Χ., Βάσση Α. 2001. Κατανάλωση θρεπτικού διαλύματος σε υδροπονική καλλιέργεια ζέρμπερας σε εξάρτηση από χρόνο ημέρας, εποχή έτους και κλιματικούς παράγοντες.
- Τσιρογιάννης Ι.Λ., 1996. Ιστορία των θερμοκηπίων, Ιστορία, τεύχος 342, σελ. 104-111.

Summary - Water management of greenhouse cultivations using plant water condition indices

Efficient irrigation leads to quantitative and qualitative improvement of greenhouse cultivations yield when at the same time contributes to the diminution of inputs and the undesirable outputs of the cultivations. Irrigation management concerns the determination of both frequency and amount of watering events which are linked to the estimation of the cultivation water needs and the capacity of substrate to hold water and can be done using a number of approaches (manually, time scheduling, sensor driven etc.). In this framework and from the practical side of view, applications that are based on simple sensors outputs like those that measure solar radiation and substrate moisture are of great interest. But, none of these applications take account of the condition of the cultivation and for this reason scientific research has focused in the possibilities of managing irrigation using direct measurements of plant status parameters.

The first of the main parts of this thesis concerns the evaluation of a series of existing and new water status indices, which are based on reflectance from the cultivation canopy measurements, in order to confine those that could have practical interest for irrigation management inside greenhouses. The experiments concerned ornamental and vegetable cultivations and more specifically gerbera and rocket. The reflectance was measured using a portable multispectral radiometer which measures in 8 narrow spectral areas centered at 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 and 810nm while for the diminution of signal noises (i.e. framework and machinery shadows) a special technique was used (white reference surface). At the same time a number of environmental, cultivation and substrate parameters were monitored. In the framework of the gerbera experiment the correlation of a number of reflectance spectral indices with generally accepted water status indices like stomatal conductance (gs) and crop water stress index (CWSI) and water balance parameters like volumetric substrate moisture (θ) and evapotranspiration (ET) was evaluated. Continuing, the evaluation was focused in complex spectral indices and a number of good relations with water stress were found. Indicatively good relationships were found between the index $sPRI = (R_{560} - R_{510}) / (R_{560} + R_{510})$ and gs, sPRI and θ , and the index $NDRB1 = (R_{710} - R_{460}) / (R_{710} + R_{460})$ and CWSI in various levels of water treatment of the cultivation.

In the rocket experiment good correlation was found between the index $sNDVI2 = (R810 - R560) / (R810 + R560)$ and θ and sPRI and CWSI. A general result is that as water stress gets more intense sPRI gets lower values.

The results showed that there is a straightforward relationship between water availability and water status with reflectance indices in the visible area of the spectrum for both cultivations. The existence of significant differences in reflectance spectrums only between irrigated treatments and treatments under strong water stress leads to the conclusion that reflectance in the visible area can be used to track water stress only if this is intense. Relevant opinions have been published by other researchers too. In every case the utilization of multispectral reflectance indices consists a promising research area which could produce direct and representative methods for the estimation of the water condition of a greenhouse cultivation.

It is reasonable to think that as a typical system sums the solar energy that reaches the pyranometer outside the greenhouse in order to trigger irrigation events it irrigates independently of the condition of the cultivation. Probably a system could do something similar -but taking account of the condition of the cultivation- by using an index based on reflectance from the canopy.

The second of the main parts of the thesis deals with the evaluation of substrate moisture status sensors (measurement of volumetric water content of the substrate and electrical conductivity of the substrate water) regarding their application for the automatic determination of irrigation scheduling parameters. The trials were made using a greenhouse tomato cultivation. Additionally the evaluation concerned the potential of these sensors to be used in conjunction with common irrigation scheduling techniques like time control and control using the integral of solar radiation outside the greenhouse. The relevant parameters were monitored using a series of sensors (Delta T, ThetaProbe, Decagon Devices, EC5, Decagon Devices, 10HS and Grodan WCM-Control) when at the same time a number of environmental parameters were monitored.

The basic conclusion was that the main problem regarding the use of substrate parameters sensors was the broad variability of measurements which were dependent by the point of measurement inside the greenhouse and in the substrate (from top, from side etc) and from the sampling volume which was used by each sensor. It's more likely that the sensors themselves was not then main problem but other causes like the irrigation system setup, the irrigation schedule etc. played a most significant role in the distribution of measurements.

Trials that concerned the combination of the solar radiation integral for the determination of irrigation frequency and the substrate moisture (by a sensor placed

in a representative point of the substrate) for the determination of water amount and the probable night irrigation were successful. Also the use of moisture sensor for the production of alarm signals should be recommended in every automatic irrigation system. Very interesting would be a direct evaluation in yield and water efficiency of a number of alternatives regarding automatic irrigation control.

Furthermore a number of collateral facts resulted in the framework of the thesis, like evaluation of greenhouse evapotranspiration models, evaluation of irrigation strategies, equations for the calculation of leaf area index and equations for calibrating substrate moisture and electric conductivity sensors.